CAPÍTULO

4

ANÁLISIS DE ENERGÍA DE SISTEMAS CERRADOS

En el capítulo 2 se consideraron varias formas de energía y transferencia de energía, y se desarrolló una relación general para el principio de conservación de energía o balance de energía. Después, en el capítulo 3, se aprendió cómo determinar las propiedades termodinámicas de las sustancias. En este capítulo se aplica la relación de balance de energía a sistemas que no tienen que ver con ningún flujo másico que cruce sus fronteras; es decir, sistemas cerrados.

Este capítulo inicia con una explicación acerca del *trabajo de frontera móvil* o *trabajo P dV* que es posible encontrar generalmente en dispositivos reciprocantes como motores de automóviles y compresores. Más adelante, se presenta la aplicación de la relación del *balance general de energía*, que se expresa en forma simple como $E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}} = \Delta E_{\text{sistema}}$, para sistemas relacionados con una sustancia pura. Luego, se definen los *calores específicos*, se obtienen relaciones para la energía interna y la entalpía de *gases ideales* en términos de calores específicos y cambios de temperatura, y se llevan a cabo balances de energía en varios sistemas en los que intervienen gases ideales. Se repite esto para sistemas relacionados con sólidos y líquidos, que se aproximan como *sustancias incompresibles*.

OBJETIVOS

En el capítulo 4, los objetivos son:

- Examinar el trabajo de frontera móvil o trabajo *P dV* que se encuentra comúnmente en dispositivos reciprocantes como motores de automóviles y compresores.
- Identificar la primera ley de la termodinámica como un enunciado del principio de conservación de la energía para sistemas cerrados (masa fija).
- Desarrollar el balance general de energía aplicado a sistemas cerrados.
- Definir el calor específico a volumen constante y el calor específico a presión constante.
- Relacionar los calores específicos con el cálculo de cambios en la energía interna y la entalpía de gases ideales.
- Describir sustancias incompresibles y determinar los cambios en su energía interna y entalpía.
- Resolver problemas de balance de energía para sistemas cerrados (masa fija) que tienen que ver con interacciones de calor y trabajo para sustancias puras en general, gases ideales y sustancias incompresibles.

4-1 ▪ TRABAJO DE FRONTERA MÓVIL

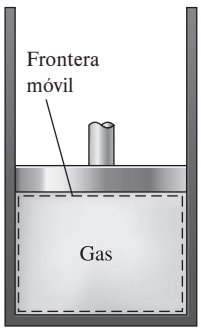


FIGURA 4-1

El trabajo relacionado con una frontera móvil se llama *trabajo de frontera*.

Una forma de trabajo mecánico muy común en la práctica es aquella que está relacionada con la expansión o compresión de un gas en un dispositivo de cilindro-émbolo. Durante este proceso, parte de la frontera (la cara interna del émbolo) se mueve en vaivén; por lo tanto, el trabajo de expansión y compresión suele llamarse **trabajo de frontera móvil** o simplemente **trabajo de frontera** (Fig. 4-1). Algunos lo llaman trabajo $P\,dV$ por razones que se explicarán más adelante. El trabajo de frontera móvil es la principal forma de trabajo relacionado con los *motores de automóviles*. Durante su expansión, los gases de combustión fuerzan al émbolo a moverse, el cual a su vez obliga al cigüeñal a girar.

El trabajo de frontera móvil relacionado con motores o compresores reales no se puede determinar de forma precisa a partir solamente de un análisis termodinámico, porque el émbolo por lo general se mueve a muy altas velocidades, lo cual dificulta que el gas en el interior mantenga su equilibrio. Entonces, los estados por los que pasa el sistema durante el proceso no se pueden especificar y tampoco es posible trazar alguna trayectoria del proceso. Por ser una función de la trayectoria, el trabajo no se puede determinar de forma analítica sin conocerla. Por lo tanto, el trabajo de frontera en motores o compresores reales se determina mediante mediciones directas.

En esta sección se analiza el trabajo de frontera móvil para un *proceso de cuasiequilibrio*, durante el cual el sistema permanece cercano al equilibrio todo el tiempo. Un proceso de cuasiequilibrio, llamado también *proceso cuasiestático*, se aproxima mucho al realizado por los motores reales, en particular cuando el émbolo se mueve a velocidades bajas. En idénticas condiciones se observa que el trabajo producido por los motores es un máximo, y el que entra a los compresores es un mínimo, cuando se emplean procesos de cuasiequilibrio en lugar de procesos sin cuasiequilibrio. A continuación se evalúa el trabajo relacionado con una frontera móvil para un proceso de cuasiequilibrio.

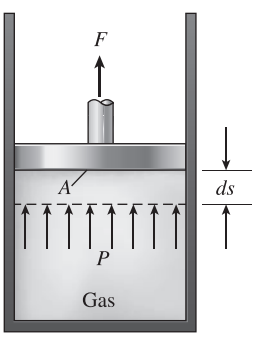


FIGURA 4-2

Un gas realiza una cantidad diferencial de trabajo δW_b cuando éste fuerza al émbolo a moverse una cantidad diferencial ds.

Considere gas encerrado en el dispositivo de cilindro-émbolo que se muestra en la figura 4-2. La presión inicial del gas es P, el volumen total es V y el área de sección transversal del émbolo es A. Si se permite al émbolo moverse una distancia ds de modo que se mantenga el cuasiequilibrio, el trabajo diferencial hecho durante este proceso es

$$\delta W_b = F\,ds = PA\,ds = P\,dV \qquad \textbf{(4-1)}$$

Es decir, el trabajo de frontera en la forma diferencial es igual al producto de la presión absoluta P por el cambio diferencial en el volumen dV del sistema. Esta expresión también explica por qué el trabajo de frontera móvil se llama a veces trabajo $P\,dV$.

Observe en la ecuación 4-1 que P es la presión absoluta, la cual siempre es positiva. Sin embargo, el cambio de volumen dV es positivo durante un proceso de expansión (incremento de volumen) y negativo durante uno de compresión (disminución de volumen). Así, el trabajo de frontera es positivo durante un proceso de expansión y negativo durante uno de compresión. Por lo tanto, la ecuación 4-1 se puede considerar como una expresión para el trabajo de frontera producido, $W_{b,\text{salida}}$. Un resultado negativo indica entrada de trabajo de frontera (compresión).

El trabajo de frontera total realizado durante el proceso completo a medida que se mueve el émbolo, se obtiene sumando los trabajos diferenciales desde los estados inicial hasta el final:

$$W_b = \int_1^2 P\,dV \qquad (\text{kJ}) \qquad \textbf{(4-2)}$$

Esta integral se puede evaluar sólo si se conoce la relación funcional entre P y V durante el proceso; es decir, $P = f(V)$ debe estar disponible. Note que $P = f(V)$ es simplemente la ecuación de la trayectoria del proceso en un diagrama P-V.

El proceso de expansión en cuasiequilibrio descrito se muestra en un diagrama P-V en la figura 4-3, en la que el área diferencial dA es igual a $P\,dV$, que es el trabajo diferencial. El área total A bajo la curva del proceso 1-2 se obtiene sumando estas áreas diferenciales:

$$\text{Área} = A = \int_1^2 dA = \int_1^2 P\,dV \qquad \textbf{(4-3)}$$

Una comparación de esta ecuación con la 4-2 revela que *el área bajo la curva del proceso en un diagrama P-V es igual en magnitud al trabajo hecho en cuasiequilibrio durante una expansión o proceso de compresión de un sistema cerrado*. (En el diagrama P-V, representa el trabajo de frontera hecho por unidad de masa.)

Un gas puede seguir varias trayectorias cuando se expande del estado 1 al 2. En general, cada trayectoria tendrá debajo un área diferente y, puesto que ésta representa la magnitud del trabajo, el trabajo hecho será diferente para cada proceso (Fig. 4-4). Esto es de esperarse, ya que el trabajo es una función de la trayectoria (es decir, depende de la trayectoria seguida así como de los estados finales). Si el trabajo no fuera una función de la trayectoria, ningún dispositivo cíclico (motores automotrices, centrales eléctricas) podría operar como productor de trabajo. El trabajo producido por éstos durante una parte del ciclo tendría que ser consumido durante otra, y no habría salida neta de trabajo. El ciclo mostrado en la figura 4-5 produce una salida neta de trabajo porque el trabajo hecho por el sistema durante el proceso de expansión (área bajo la trayectoria A) es mayor al realizado sobre el sistema en el momento de compresión del ciclo (área bajo la trayectoria B), y la diferencia entre estos dos es el trabajo neto hecho durante el ciclo (área sombreada).

Si la relación entre P y V durante un proceso de expansión o compresión se da en términos de datos experimentales en lugar de en forma funcional, es evidente que no se puede llevar a cabo la integración analítica, pero siempre es posible graficar el diagrama P-V del proceso con estos puntos de datos, así como calcular de forma gráfica el área debajo para determinar el trabajo hecho.

En sentido estricto, en la ecuación 4-2 P es la presión sobre la superficie interna del émbolo, y se vuelve igual a la del gas en el cilindro sólo si el proceso es de cuasiequilibrio; por lo tanto, en determinado momento todo el gas en el cilindro está a la misma presión. La ecuación 4-2 también se puede usar para procesos sin cuasiequilibrio siempre y cuando la presión *en la cara interna del émbolo* se use para P. (Además, no se puede hablar de la presión de un *sistema* durante un proceso sin cuasiequilibrio porque las propiedades se definen sólo para estados de equilibrio.) Por lo tanto, se puede generalizar la relación de trabajo de frontera expresándola como

$$W_b = \int_1^2 P_i\,dV \qquad \textbf{(4-4)}$$

donde P_i es la presión en la cara interna del émbolo.

Observe que el trabajo es un mecanismo para la interacción de energía entre un sistema y sus alrededores, y W_b representa la cantidad de energía transferida desde el sistema durante un proceso de expansión (o hacia el sistema durante uno de compresión). Así, tiene que aparecer en alguna otra parte y debe ser

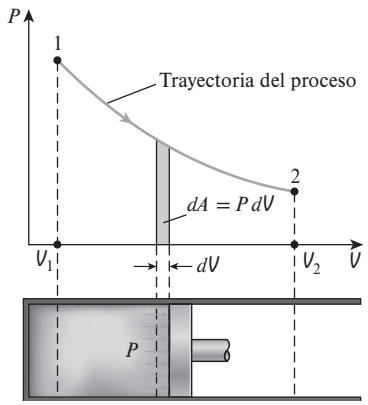


FIGURA 4-3

El área bajo la curva de proceso en un diagrama P-V representa el trabajo de frontera.

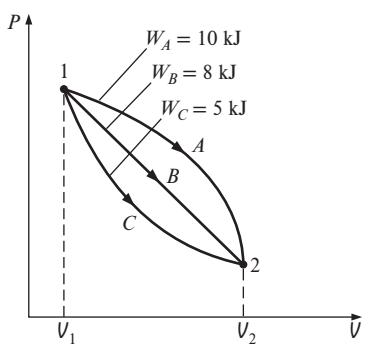


FIGURA 4-4

El trabajo de frontera realizado durante un proceso depende de la trayectoria seguida, así como de los estados finales.

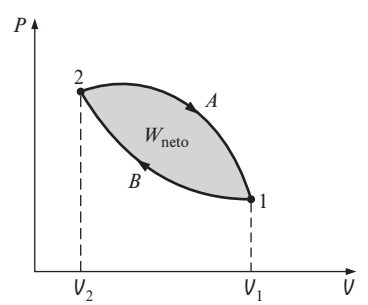


FIGURA 4-5

El trabajo neto hecho durante un ciclo es la diferencia entre el trabajo hecho por el sistema y el trabajo hecho sobre el sistema.

posible justificarlo porque la energía se conserva. En un motor de automóvil, por ejemplo, el trabajo de frontera realizado mediante la expansión de gases calientes se usa para vencer la fricción entre el émbolo y el cilindro, remover el aire atmosférico del camino de émbolo y hacer girar el cigüeñal. Por lo tanto,

$$W_b = W_{\text{fricción}} + W_{\text{atm}} + W_{\text{cigüeñal}} = \int_1^2 (F_{\text{fricción}} + P_{\text{atm}}A + F_{\text{cigüeñal}})\, dx \qquad \textbf{(4-5)}$$

Por supuesto, el trabajo usado para vencer la fricción aparece como calor de fricción y la energía transmitida por el cigüeñal pasa a otros componentes (como los neumáticos) para efectuar ciertas funciones. Sin embargo, observe que la energía transferida por el sistema como trabajo debe ser igual a la energía que reciben tanto el cigüeñal como la atmósfera y la energía usada para vencer la fricción. El uso de la relación de trabajo de frontera no se limita a los procesos de cuasiequilibrio de gases, también se puede usar para sólidos y líquidos.

EJEMPLO 4-1 **Trabajo de frontera para un proceso a volumen constante**

Un recipiente rígido contiene aire a 500 kPa y 150 °C. Como resultado de la transferencia de calor hacia los alrededores, la temperatura y la presión dentro del recipiente descienden a 65 °C y 400 kPa, respectivamente. Determine el trabajo de frontera hecho durante este proceso.

SOLUCIÓN En un recipiente rígido se enfría aire y se disminuye en la presión y la temperatura. Se determinará el trabajo de frontera realizado.

Análisis En la figura 4-6 se muestran un bosquejo del sistema y el diagrama *P-V* del proceso. El trabajo de frontera se determina de la ecuación 4-2 como

$$W_b = \int_1^2 P\, dV \overset{0}{\nearrow} = 0$$

Comentario Esto es de esperarse porque un recipiente rígido tiene un volumen constante y $dV = 0$ en esta ecuación. Por lo tanto, en este proceso no se realiza trabajo de frontera: es decir, el trabajo de frontera realizado durante un proceso a volumen constante es siempre cero. Esto también es evidente en el diagrama *P-V* del proceso (el área bajo la curva de proceso es cero).

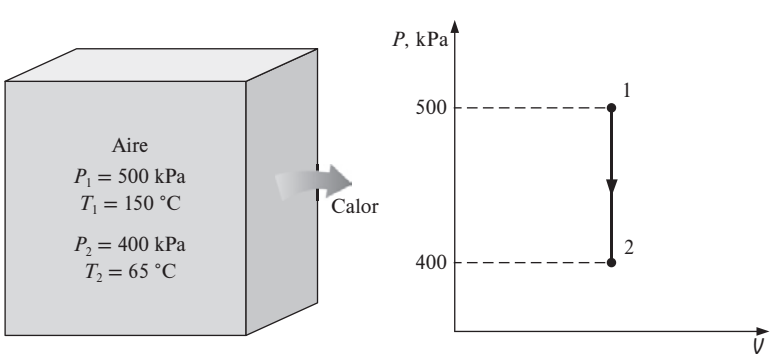


FIGURA 4-6

Esquema y diagrama *P-V* para el ejemplo 4-1.

EJEMPLO 4-2 **Trabajo de frontera para un proceso a presión constante**

Un dispositivo sin fricción que consta de cilindro-émbolo contiene 10 lbm de vapor a 60 psia y 320 °F. Se transfiere calor al vapor hasta que la temperatura alcanza 400 °F. Si el émbolo no está unido a una flecha y su masa es constante, determine el trabajo que realiza el vapor durante este proceso.

SOLUCIÓN Se calienta vapor en un dispositivo de cilindro-émbolo y la temperatura sube a presión constante. Se determinará el trabajo de frontera que se lleva a cabo.

Suposición El proceso de expansión es de cuasiequilibrio.

Análisis En la figura 4-7 se muestran un bosquejo del sistema y el diagrama *P-V* del proceso. Aunque no se expresa explícitamente, la presión del vapor dentro del cilindro permanece constante durante este proceso, ya que tanto la presión atmosférica como el peso del émbolo permanecen constantes. Por lo tanto, éste es un proceso a presión constante, por lo que de la ecuación 4-2

$$W_b = \int_1^2 P\,dV = P_0 \int_1^2 dV = P_0(V_2 - V_1) \qquad (4\text{-}6)$$

o bien,

$$W_b = mP_0(v_2 - v_1)$$

dado que $V = mv$. De la tabla de vapor sobrecalentado (tabla A-6E), los volúmenes específicos se determinan como $v_1 = 7.4863$ pies^3/lbm en el estado 1 (60 psia, 320 °F) y $v_2 = 8.3548$ pies^3/lbm en el estado – (60 psia, 400 °F). Si se sustituyen estos valores se obtiene

$$W_b = (10\ \text{lbm})(60\ \text{psia})[(8.3548 - 7.4863)\ \text{pies}^3/\text{lbm}]\left(\frac{1\ \text{Btu}}{5.404\ \text{psia}\cdot\text{pies}^3}\right)$$

$$= 96.4\ \text{Btu}$$

Comentario El signo positivo indica que el sistema realiza trabajo; es decir, el vapor usó 96.4 Btu de su energía para llevar a cabo este trabajo, cuya magnitud podría determinarse también calculando el área bajo la curva del proceso en un diagrama *P-V*, que en este caso es simplemente $P_0\,\Delta V$.

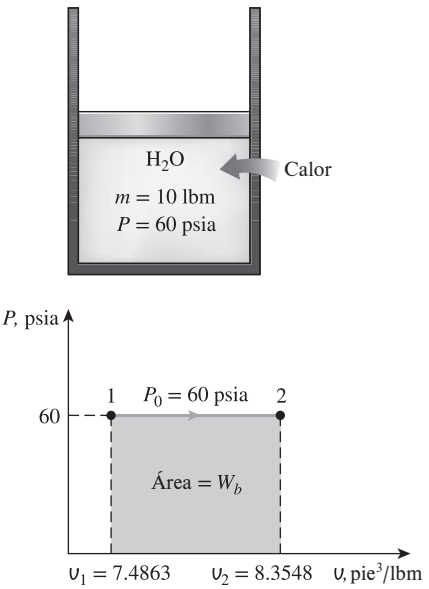


FIGURA 4-7

Esquema y diagrama *P-V* para el ejemplo 4-2.

EJEMPLO 4-3 Compresión isotérmica de un gas ideal

Al inicio un dispositivo de cilindro-émbolo contiene 0.4 m^3 de aire a 100 kPa y 80 °C. Se comprime el aire a 0.1 m^3 de tal manera que la temperatura dentro del cilindro permanece constante. Determine el trabajo hecho durante este proceso.

SOLUCIÓN Se comprime aire isotérmicamente dentro de un dispositivo de cilindro-émbolo. Se determinará el trabajo de frontera realizado.

Suposiciones **1** El proceso de compresión es de cuasiequilibrio. **2** En las condiciones especificadas se puede considerar que el aire es un gas ideal porque está a una temperatura alta y a una baja presión en relación con sus valores de punto crítico.

Análisis En la figura 4-8 se presenta un bosquejo del sistema y el diagrama *P-V* del proceso. Para un gas ideal a temperatura constante T_0,

$$PV = mRT_0 = C \quad \text{o} \quad P = \frac{C}{V}$$

donde *C* es una constante. Al sustituir esto en la ecuación 4-2 se obtiene

$$W_b = \int_1^2 P\,dV = \int_1^2 \frac{C}{V}\,dV = C\int_1^2 \frac{dV}{V} = C\ln\frac{V_2}{V_1} = P_1V_1\ln\frac{V_2}{V_1} \qquad (4\text{-}7)$$

En la ecuación 4-7 es posible reemplazar P_1V_1 por P_2V_2 o mRT_0. Asimismo, V_2/V_1 se reemplaza por P_1/P_2 para este caso, ya que $P_1V_1 = P_2V_2$.

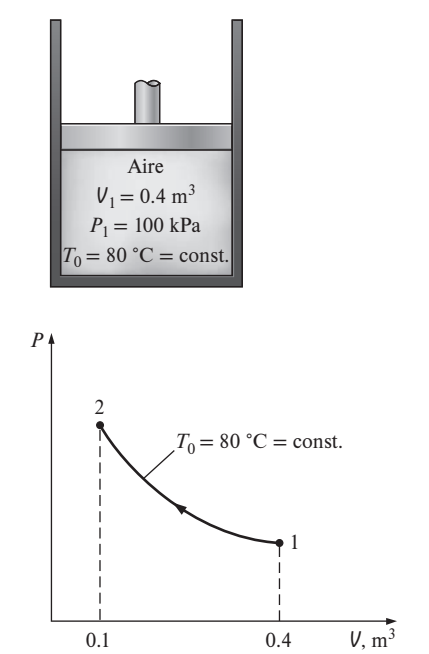


FIGURA 4-8

Esquema y diagrama *P-V* para el ejemplo 4-3.

Al sustituir los valores numéricos en la ecuación 4-7 se obtiene

$$W_b = (100\ \text{kPa})(0.4\ \text{m}^3)\left(\ln\frac{0.1}{0.4}\right)\left(\frac{1\ \text{kJ}}{1\ \text{kPa}\cdot\text{m}^3}\right)$$

$$= \mathbf{-55.5\ kJ}$$

Comentario El signo negativo indica que este trabajo se hace sobre el sistema (una entrada de trabajo), que siempre es el caso para procesos de compresión.

Proceso politrópico

Durante procesos reales de expansión y compresión de gases, la presión y el volumen suelen relacionarse mediante $PV^n = C$, donde n y C son constantes. Un proceso de esta clase se llama **proceso politrópico** (Fig. 4-9). A continuación se desarrolla una expresión general para el trabajo realizado durante un proceso politrópico. La presión para un proceso de este tipo se puede expresar como

$$P = CV^{-n} \tag{4-8}$$

Al sustituir esta relación en la ecuación 4-2 se obtiene

$$W_b = \int_1^2 P\,dV = \int_1^2 CV^{-n}\,dV = C\,\frac{V_2^{-n+1} - V_1^{-n+1}}{-n+1} = \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{1-n} \tag{4-9}$$

dado que $C = P_1V_1^n = P_2V_2^n$. Para un gas ideal ($PV = mRT$), esta ecuación se puede escribir también como

$$W_b = \frac{mR(T_2 - T_1)}{1-n} \qquad n \neq 1 \qquad (\text{kJ}) \tag{4-10}$$

Para el caso especial de $n = 1$, el trabajo de frontera se convierte en

$$W_b = \int_1^2 P\,dV = \int_1^2 CV^{-1}\,dV = PV\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

Para un gas ideal este resultado es equivalente al proceso isotérmico analizado en el ejemplo anterior.

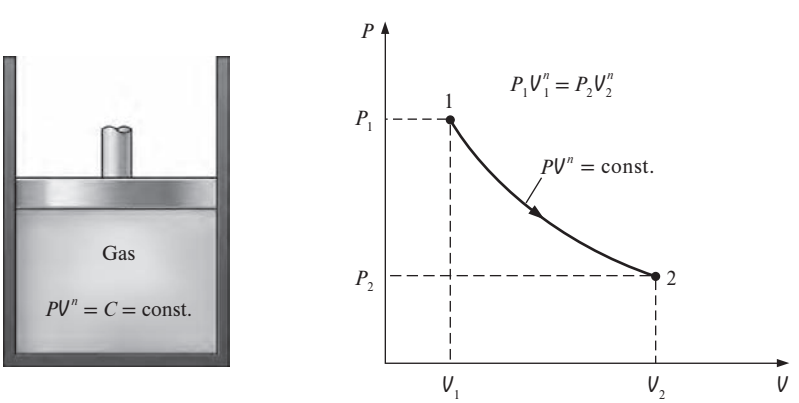


FIGURA 4-9
Esquema y diagrama *P-V* para un proceso politrópico.

EJEMPLO 4-4 **Expansión de un gas ideal contra un resorte**

Un dispositivo de cilindro-émbolo contiene 0.05 m^3 de un gas que se halla inicialmente a 200 kPa. En este estado, un resorte lineal que tiene una constante de resorte de 150 kN/m está en contacto con el émbolo sin ejercer ninguna fuerza sobre él. Después se transfiere calor al gas de modo que el émbolo sube y comprime el resorte hasta que el volumen dentro del cilindro se duplica. Si el área de sección transversal del émbolo es de 0.25 m^2, determine *a*) la presión final dentro del cilindro, *b*) el trabajo total hecho por el gas y *c*) la fracción de trabajo realizado contra el resorte para comprimirlo.

SOLUCIÓN En un dispositivo de cilindro-émbolo equipado con un resorte lineal se expande un gas debido al calentamiento. Se determinarán la presión final del gas, el trabajo total realizado y la fracción del trabajo hecho para comprimir el resorte.

Suposiciones **1** El proceso de expansión es de cuasiequilibrio. **2** El resorte es lineal en el intervalo de interés.

Análisis En la figura 4-10 se muestran un bosquejo del sistema y el diagrama *P-V* del proceso.

a) El volumen encerrado en el estado final es

$$V_2 = 2V_1 = (2)(0.05\ \text{m}^3) = 0.1\ \text{m}^3$$

El desplazamiento del émbolo (y del resorte) es

$$x = \frac{\Delta V}{A} = \frac{(0.1 - 0.05)\ \text{m}^3}{0.25\ \text{m}^2} = 0.2\ \text{m}$$

La fuerza aplicada por el resorte lineal en el estado final es

$$F = kx = (150\ \text{kN/m})(0.2\ \text{m}) = 30\ \text{kN}$$

La presión adicional que el resorte aplica sobre el gas en este estado es

$$P = \frac{F}{A} = \frac{30\ \text{kN}}{0.25\ \text{m}^2} = 120\ \text{kPa}$$

Sin el resorte, la presión del gas permanecería constante en 200 kPa mientras sube el émbolo. Pero bajo el efecto del resorte, la presión aumenta en forma lineal de 200 kPa a

$$200 + 120 = \mathbf{320\ kPa}$$

en el estado final.

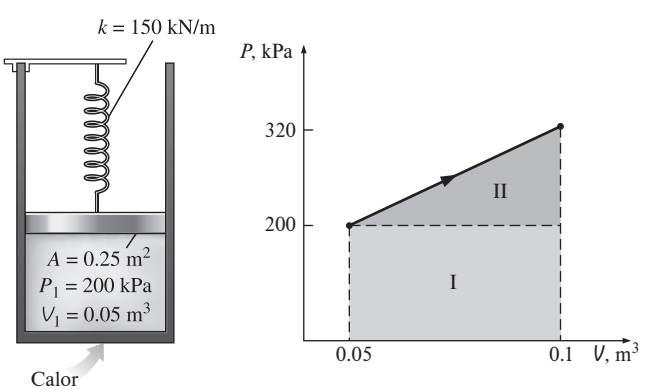


FIGURA 4-10
Esquema y diagrama *P-V* para el ejemplo 4-4.

b) Una forma fácil de hallar el trabajo realizado es graficar el proceso en un diagrama *P-V* y encontrar el área bajo la curva del proceso. De la figura 4-10 el área bajo la curva del proceso (un trapezoide) se determina como

$$W = \text{área} = \frac{(200 + 320)\,\text{kPa}}{2}\,[(0.1 - 0.05)\,\text{m}^3)]\left(\frac{1\,\text{kJ}}{1\,\text{kPa}\cdot\text{m}^3}\right) = \mathbf{13\ kJ}$$

Note que el sistema es el que realiza el trabajo.

c) El trabajo representado por el área rectangular (región I) se realiza contra el émbolo y la atmósfera, mientras que el representado por el área triangular (región II) se hace contra el resorte. Por lo tanto,

$$W_{\text{resorte}} = \tfrac{1}{2}[(320 - 200)\,\text{kPa}](0.05\,\text{m}^3)\left(\frac{1\,\text{kJ}}{1\,\text{kPa}\cdot\text{m}^3}\right) = \mathbf{3\ kJ}$$

Comentario Este resultado se podría haber obtenido también de

$$W_{\text{resorte}} = \tfrac{1}{2}k(x_2^2 - x_1^2) = \tfrac{1}{2}(150\,\text{kN/m})[(0.2\,\text{m})^2 - 0^2]\left(\frac{1\,\text{kJ}}{1\,\text{kN}\cdot\text{m}}\right) = 3\,\text{kJ}$$

4-2 ▪ BALANCE DE ENERGÍA PARA SISTEMAS CERRADOS

El balance de energía para cualquier sistema que experimenta alguna clase de proceso se expresó como (véase el capítulo 2)

$$\underbrace{E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}}}_{\substack{\text{Transferencia neta de energía}\\ \text{por calor, trabajo y masa}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Cambio en las energías}\\ \text{interna, cinética, potencial,}\\ \text{etcétera}}} \quad (\text{kJ}) \qquad \textbf{(4-11)}$$

o bien, en la **forma de tasa**, como

$$\underbrace{\dot{E}_{\text{entrada}} - \dot{E}_{\text{salida}}}_{\substack{\text{Tasa de transferencia neta}\\ \text{de energía por calor, trabajo}\\ \text{y masa}}} = \underbrace{dE_{\text{sistema}}/dt}_{\substack{\text{Tasa de cambio de energías}\\ \text{interna, cinética, potencial,}\\ \text{etcétera}}} \quad (\text{kW}) \qquad \textbf{(4-12)}$$

Para tasas constantes, las cantidades totales durante un intervalo de tiempo Δt se relacionan con las cantidades por unidad de tiempo como

$$Q = \dot{Q}\,\Delta t, \quad W = \dot{W}\Delta t \quad \text{y} \quad \Delta E = (dE/dt)\Delta t \quad \textbf{(kJ)} \qquad \textbf{(4-13)}$$

El balance de energía se puede expresar por **unidad de masa** como

$$e_{\text{entrada}} - e_{\text{salida}} = \Delta e_{\text{sistema}} \quad (\text{kJ/kg}) \qquad \textbf{(4-14)}$$

que se obtiene al dividir las cantidades de la ecuación 4-11 entre la masa m del sistema. El balance de energía se puede expresar también en forma diferencial como

$$\delta E_{\text{entrada}} - \delta E_{\text{salida}} = dE_{\text{sistema}} \quad \text{o} \quad \delta e_{\text{entrada}} - \delta e_{\text{salida}} = de_{\text{sistema}} \qquad \textbf{(4-15)}$$

Para un sistema cerrado que experimenta un **ciclo**, los estados inicial y final son idénticos, por lo tanto, $\Delta E_{\text{sistema}} = E_2 - E_1 = 0$. Entonces, el balance de energía para un ciclo se simplifica a $E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}} = 0$ o $E_{\text{entrada}} = E_{\text{salida}}$. Al observar que un sistema cerrado no tiene que ver con ningún flujo másico que

cruce sus fronteras, el balance de energía para un ciclo se puede expresar en términos de interacciones de calor y trabajo como

$$W_{\text{neto,salida}} = Q_{\text{neto,entrada}} \quad \text{o} \quad \dot{W}_{\text{neto,salida}} = \dot{Q}_{\text{neto,entrada}} \quad \text{(para un ciclo)} \quad \textbf{(4-16)}$$

Es decir, la salida de trabajo neto durante un ciclo es igual a la entrada neta de calor (Fig. 4-11).

Las relaciones de balance de energía (o la primera ley) expresadas anteriormente son de naturaleza intuitiva y fáciles de usar cuando se conocen las magnitudes y las direcciones de las transferencias de calor y trabajo. Sin embargo, al efectuar un estudio analítico general o resolver un problema relacionado con una interacción desconocida de calor o trabajo, es necesario suponer una dirección para estas interacciones. En tales casos, es común usar la convención de signos de la termodinámica clásica y suponer el calor que se transferirá *al sistema* (entrada de calor) en la cantidad Q, así como el trabajo que realizará *el sistema* (salida de trabajo) en la cantidad W, para después resolver el problema. La relación del balance de energía en este caso para un sistema cerrado se convierte en

$$Q_{\text{neto,entrada}} - W_{\text{neto,salida}} = \Delta E_{\text{sistema}} \quad \text{o} \quad Q - W = \Delta E \qquad \textbf{(4-17)}$$

donde $Q = Q_{\text{neto,entrada}} = Q_{\text{entrada}} - Q_{\text{salida}}$ es la *entrada neta de calor* y $W = W_{\text{neto,salida}} = W_{\text{salida}} - W_{\text{entrada}}$ es la *salida neta de trabajo*. Obtener una cantidad negativa para Q o W significa simplemente que la dirección supuesta para esa cantidad es errónea y debe invertirse. En la figura 4-12 se ofrecen varias formas de esta "tradicional" relación de la primera ley para sistemas cerrados.

La primera ley no se puede probar en forma matemática, pero tampoco se sabe de algún proceso en la naturaleza que la haya violado, y esto se debe tomar como demostración suficiente. Observe que si fuera posible probar la primera ley con base en otros principios físicos, entonces ésta sería una consecuencia de tales principios en lugar de ser por sí misma una ley física fundamental.

El calor y el trabajo no son distintos como cantidades de energía, y quizá se pregunte por qué aún así se les diferencia, ya que después de todo el cambio en el contenido de energía de un sistema es igual a la cantidad de energía que cruza las fronteras del sistema, y no importa si la energía los cruza en forma de calor o trabajo. En apariencia, las relaciones de la primera ley serían mucho más simples si se tuviera una cantidad que podríamos llamar *interacción de energía* para representar tanto al calor como al trabajo; así, desde el punto de vista de la primera ley, tanto el calor como el trabajo no son diferentes en absoluto, pero desde el punto de vista de la segunda ley, sin embargo, calor y trabajo son muy diferentes, como se explica en capítulos posteriores.

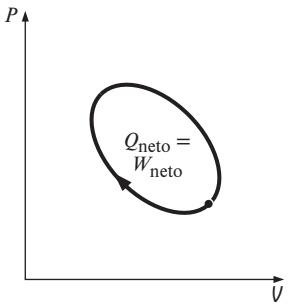


FIGURA 4-11
Para un ciclo, $\Delta E = 0$; por lo tanto $Q = W$.

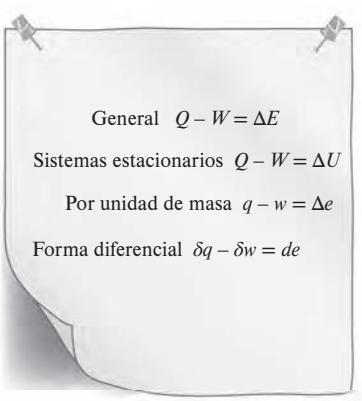
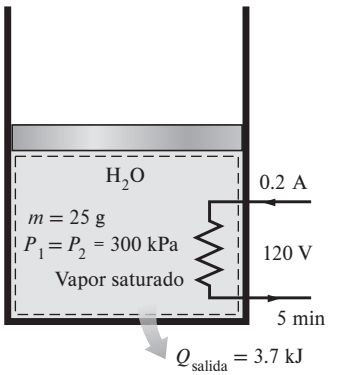


FIGURA 4-12
Diversas formas de la relación de la primera ley para sistemas cerrados.

EJEMPLO 4-5 **Calentamiento eléctrico de un gas a presión constante**

Un dispositivo de cilindro-émbolo contiene 25 g de vapor de agua saturado que se mantiene a una presión constante de 300 kPa. Se enciende un calentador de resistencia eléctrica dentro del cilindro y pasa una corriente de 0.2 A durante cinco minutos desde una fuente de 120 V. Al mismo tiempo, ocurre una pérdida de calor de 3.7 kJ. *a*) Muestre que para un sistema cerrado el trabajo de frontera W_b y el cambio de energía interna ΔU en la relación de la primera ley se puede combinar en un término, ΔH, para un proceso a presión constante. *b*) Determine la temperatura final del vapor.

SOLUCIÓN En un dispositivo de cilindro-émbolo se expande vapor de agua saturado a presión constante debido al calentamiento. Se demostrará que $\Delta U + W_b = \Delta H$, y se determinará la temperatura final.



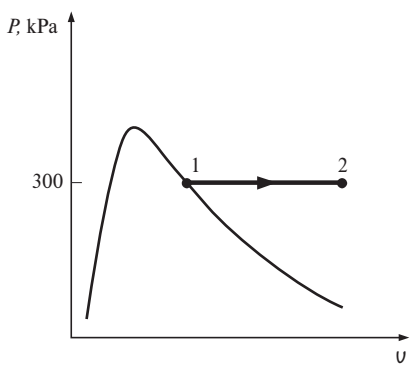


FIGURA 4-13

Esquema y diagrama *P-V* para el ejemplo 4-5.

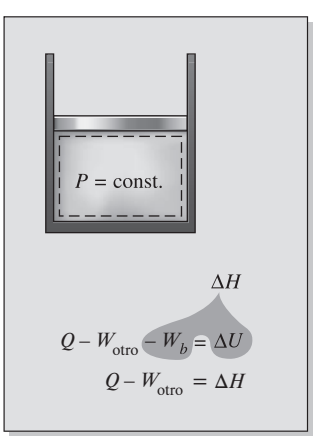


FIGURA 4-14

Para un sistema cerrado que experimenta un proceso de cuasiequilibrio con $P =$ constante, $\Delta U + W_b = \Delta H$. Observe que esta relación NO es válida para procesos de sistemas cerrados durante los cuales la presión NO permanece constante.

Suposiciones **1** El recipiente es estacionario, por lo tanto los cambios de energía cinética y potencial son cero, $\Delta EC = \Delta EP = 0$. Por consiguiente $\Delta E = \Delta U$ y la energía interna es la única forma de energía del sistema que puede cambiar durante este proceso. **2** Los cables eléctricos constituyen una parte muy pequeña del sistema, así que se puede ignorar el cambio de energía en ellos.

Análisis Se toma el contenido del cilindro, incluidos los alambres de la resistencia, como el *sistema* (Fig. 4-13), el cual es un *sistema cerrado* porque ninguna masa cruza sus fronteras durante el proceso. Se observa que un dispositivo de cilindro-émbolo normalmente se relaciona con una frontera móvil y, por ende, con trabajo de frontera W_b. La presión permanece constante durante el proceso, de modo que $P_2 = P_1$. También se pierde calor del sistema y se realiza trabajo eléctrico W_e sobre él.

a) Esta parte de la solución requiere un análisis general para un sistema cerrado que experimenta un proceso de cuasiequilibrio a presión constante, así que se considera un sistema cerrado general. Se supone que la dirección de transferencia de calor Q es hacia el sistema y que éste realiza trabajo W. Asimismo, el trabajo se expresa como la suma del trabajo de frontera y de otras formas (como el eléctrico y el de flecha). Entonces el balance de energía se puede expresar como

$$\underbrace{E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}}}_{\substack{\text{Transferencia neta de energía}\\ \text{por calor, trabajo y masa}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Cambio en las energías interna,}\\ \text{cinética, potencial, etcétera}}}$$

$$Q - W = \Delta U + \cancel{\Delta EC}^{\,0} + \cancel{\Delta EP}^{\,0}$$

$$Q - W_{\text{otro}} - W_b = U_2 - U_1$$

Para un proceso a presión constante, el trabajo de frontera está dado como $W_b = P_0(V_2 - V_1)$. Sustituyendo esto en la relación anterior se tiene

$$Q - W_{\text{otro}} - P_0(V_2 - V_1) = U_2 - U_1$$

Sin embargo,

$$P_0 = P_2 = P_1 \quad \rightarrow \quad Q - W_{\text{otro}} = (U_2 + P_2V_2) - (U_1 + P_1V_1)$$

También, $H = U + PV$, y entonces

$$Q - W_{\text{otro}} = H_2 - H_1 \qquad \text{(kJ)} \tag{4-18}$$

que es la relación buscada (Fig. 4-14). Esta ecuación es muy conveniente en el análisis de sistemas cerrados que experimentan un ***proceso de cuasiequilibrio a presión constante*** porque los términos de entalpía se ocupan del trabajo de frontera de forma automática, y ya no es necesario determinarlo por separado.

b) La única otra forma de trabajo en este caso es el trabajo eléctrico, que se puede determinar a partir de

$$W_e = VI\Delta t = (120\text{ V})(0.2\text{ A})(300\text{ s})\left(\frac{1\text{ kJ/s}}{1\,000\text{ VA}}\right) = 7.2\text{ kJ}$$

$$\textit{Estado 1:}\ \left.\begin{array}{l} P_1 = 300\text{ kPa} \\ \text{vapor sat.} \end{array}\right\} \quad h_1 = h_{g\text{ a }300\text{ kPa}} = 2\,724.9\text{ kJ/kg} \qquad \text{(Tabla A-5)}$$

La entalpía en el estado final se determina directamente de la ecuación 4-18, al expresar como cantidades negativas la transferencia de calor desde el sistema y el trabajo realizado sobre éste (ya que sus direcciones son opuestas a las direcciones estándar supuestas). De otro modo, se puede usar la relación de balance general de energía con la simplificación de que el trabajo de fron-

tera se considera de manera automática reemplazando ΔU por ΔH para un proceso de expansión o compresión a presión constante:

$$\underbrace{E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}}}_{\substack{\text{Transferencia neta de energía}\\ \text{por calor, trabajo y masa}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Cambio en las energías interna,}\\ \text{cinética, potencial, etcétera}}}$$

$$W_{e,\text{entrada}} - Q_{\text{salida}} - W_b = \Delta U$$

$$W_{e,\text{entrada}} - Q_{\text{salida}} = \Delta H = m(h_2 - h_1) \qquad \text{(dado que } P = \text{ constante)}$$

$$7.2 \text{ kJ} - 3.7 \text{ kJ} = (0.025 \text{ kg})(h_2 - 2\,724.9) \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = 2\,864.9 \text{ kJ/kg}$$

Entonces el estado final se especifica por completo porque se conoce tanto la presión como la entalpía. La temperatura en este estado es

$$\textit{Estado 2:} \quad \left.\begin{array}{l} P_2 = 300 \text{ kPa} \\ h_2 = 2\,864.9 \text{ kJ/kg} \end{array}\right\} \quad T_2 = 200\ ^\circ\text{C} \qquad \text{(Tabla A-6)}$$

Por lo tanto, el vapor estará a 200 °C al final de este proceso.

Comentario En sentido estricto, para este proceso el cambio de energía potencial del vapor no es cero porque su centro de gravedad sube un poco. Si se supone un cambio de elevación de 1 m (que es bastante improbable), el cambio en la energía potencial del vapor sería 0.0002 kJ, lo cual es muy pequeño en comparación con los otros términos en la relación de la primera ley. Por lo tanto, en problemas de esta clase se ignora siempre el término de energía potencial.

EJEMPLO 4-6 Expansión irrestricta de agua

Un recipiente rígido está dividido en dos partes iguales por una separación. Al inicio, un lado del recipiente contiene 5 kg de agua a 200 kPa y 25 °C, mientras el otro se halla vacío. Se retira la separación y el agua se expande en todo el recipiente, con lo que el agua intercambia calor con sus alrededores hasta que la temperatura en el recipiente vuelve al valor inicial de 25 °C. Determine *a*) el volumen del recipiente, *b*) la presión final y *c*) la transferencia de calor para este proceso.

SOLUCIÓN La mitad de un recipiente rígido se llena con agua líquida mientras la otra mitad está vacía. Al quitar la división el agua se expande y llena todo el recipiente mientras la temperatura permanece constante. Se determinarán el volumen del recipiente, la presión final y la transferencia de calor.

Suposiciones **1** El sistema es estacionario, por lo tanto, los cambios de energía cinética y potencial son cero, $\Delta EC = \Delta EP = 0$ y $\Delta E = \Delta U$. **2** La dirección de transferencia de calor es hacia el sistema (ganancia de calor, Q_{entrada}). Un resultado negativo para Q_{entrada} indica que la dirección supuesta es errónea, por consiguiente, es una pérdida de calor. **3** El volumen del recipiente rígido es constante, así que no hay transferencia de energía como trabajo de frontera. **4** No hay trabajo eléctrico, de flecha o de otra clase.

Análisis Se considera el contenido del recipiente, además del espacio al vacío, como el *sistema* (Fig. 4-15), el cual es *cerrado* porque ninguna masa cruza sus fronteras durante el proceso. Se observa que el agua llena todo el recipiente cuando se quita la división (posiblemente como mezcla de líquido y vapor).

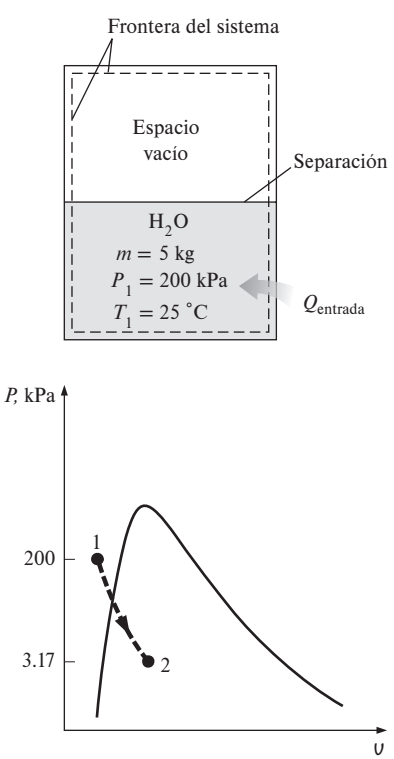


FIGURA 4-15

Esquema y diagrama *P-V* para el ejemplo 4-6.

a) Al inicio el agua en el recipiente existe como un líquido comprimido dado que su presión (200 kPa) es mayor que la presión de saturación a 25 °C (3.1698 kPa). Considerando el líquido comprimido como un líquido saturado a la temperatura dada, se tiene

$$v_1 \cong v_{f\,a\,25\,^\circ C} = 0.001003\ \text{m}^3/\text{kg} \cong 0.001\ \text{m}^3/\text{kg} \qquad \text{(Tabla A-4)}$$

Entonces el volumen inicial del agua es

$$V_1 = mv_1 = (5\ \text{kg})(0.001\ \text{m}^3/\text{kg}) = 0.005\ \text{m}^3$$

El volumen total del recipiente es el doble de esta cantidad:

$$V_{\text{recipiente}} = (2)(0.005\ \text{m}^3) = \mathbf{0.01\ m^3}$$

b) En el estado final, el volumen específico del agua es

$$v_2 = \frac{V_2}{m} = \frac{0.01\ \text{m}^3}{5\ \text{kg}} = 0.002\ \text{m}^3/\text{kg}$$

el cual es dos veces el valor inicial del volumen específico. Este resultado no es extraño ya que el volumen se duplica mientras que la cantidad de masa se mantiene constante.

$$\text{A } 25\ ^\circ\text{C}: \quad v_f = 0.001003\ \text{m}^3/\text{kg} \quad \text{y} \quad v_g = 43.340\ \text{m}^3/\text{kg} \qquad \text{(Tabla A-4)}$$

Como $v_f < v_2 < v_g$, el agua es un vapor húmedo en el estado final y por lo tanto la presión es la de saturación a 25 °C:

$$P_2 = P_{\text{sat a 25 °C}} = \mathbf{3.1698\ kPa} \qquad \text{(Tabla A-4)}$$

c) Bajo las suposiciones y observaciones expresadas, el balance de energía en el sistema se puede expresar como

$$\underbrace{E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}}}_{\substack{\text{Transferencia neta de energía} \\ \text{por calor, trabajo y masa}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Cambio en las energías interna,} \\ \text{cinética, potencial, etcétera}}}$$

$$Q_{\text{entrada}} = \Delta U = m(u_2 - u_1)$$

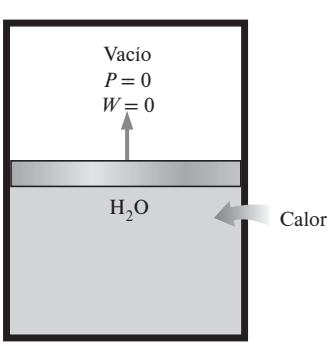


FIGURA 4-16

La expansión contra un vacío no implica trabajo, por lo tanto ninguna transferencia de energía.

Observe que aunque el agua se expande durante este proceso, el sistema elegido sólo involucra fronteras fijas (línea discontinua) y en consecuencia el trabajo de frontera móvil es cero (Fig. 4-16). Entonces, $W = 0$ porque el sistema no tiene que ver con otras formas de trabajo. (¿Es posible alcanzar las mismas conclusiones si se elige al agua como el sistema?) Inicialmente,

$$u_1 \cong u_{f\,a\,25\,^\circ C} = 104.83\ \text{kJ/kg}$$

La calidad en el estado final se determina a partir de la información del volumen específico:

$$x_2 = \frac{v_2 - v_f}{v_{fg}} = \frac{0.002 - 0.001}{43.34 - 0.001} = 2.3 \times 10^{-5}$$

Entonces

$$\begin{aligned} u_2 &= u_f + x_2 u_{fg} \\ &= 104.83\ \text{kJ/kg} + (2.3 \times 10^{-5})(2\,304.3\ \text{kJ/kg}) \\ &= 104.88\ \text{kJ/kg} \end{aligned}$$

Al sustituir se obtiene

$$Q_{\text{entrada}} = (5\ \text{kg})[(104.88 - 104.83)\ \text{kJkg}] = \mathbf{0.25\ kJ}$$

Comentario El signo positivo indica que la dirección supuesta es correcta y que se transfiere calor al agua.

4-3 ▪ CALORES ESPECÍFICOS

Se sabe por experiencia que se requieren distintas cantidades de energía para elevar en un grado la temperatura de masas idénticas pertenecientes a sustancias diferentes. Por ejemplo, se necesitan 4.5 kJ de energía para elevar la temperatura de 1 kg de hierro de 20 a 30 °C, mientras que se requiere nueve veces esta energía (41.8 kJ, para ser exactos) con la finalidad de elevar la temperatura de 1 kg de agua líquida en la misma cantidad (Fig. 4-17). Por lo tanto, es deseable tener una propiedad que permita comparar la capacidad de almacenaje de energía de varias sustancias. Esta propiedad es el calor específico.

El **calor específico** se define como *la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia* (Fig. 4-18). En general, esta energía depende de cómo se ejecute el proceso. En termodinámica, el interés se centra en dos clases de calores específicos: **calor específico a volumen constante** c_v y **calor específico a presión constante** c_p.

Desde un punto de vista físico, el calor específico a volumen constante c_v se puede considerar como *la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia cuando el volumen se mantiene constante.* La energía requerida para hacer lo mismo cuando se mantiene constante la presión es el calor específico a presión constante c_p, lo cual se ilustra en la figura 4-19. El calor específico a presión constante c_p es siempre mayor que c_v porque a presión constante se permite que el sistema se expanda y la energía para este trabajo de expansión también debe ser suministrada al sistema.

Ahora se expresarán los calores específicos en términos de otras propiedades termodinámicas. Primero, considere una masa fija en un sistema cerrado estacionario que experimenta un proceso a volumen constante (por lo tanto, no hay trabajo de expansión o compresión). El principio de conservación de energía $e_{\text{entrada}} - e_{\text{salida}} = \Delta e_{\text{sistema}}$ para este proceso puede expresarse en forma diferencial como

$$\delta e_{\text{entrada}} - \delta e_{\text{salida}} = du$$

El lado izquierdo de esta ecuación representa la cantidad neta de energía transferida al sistema. A partir de la definición de c_v, esta energía debe ser igual a $c_v dT$, donde dT es el cambio diferencial de temperatura. Así,

$$c_v\, dT = du \qquad \text{a volumen constante}$$

o bien,

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v \tag{4-19}$$

De manera similar, una expresión para el calor específico a presión constante c_p se obtiene al considerar un proceso de expansión o compresión a presión constante,

$$c_p = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_p \tag{4-20}$$

Las ecuaciones 4-19 y 4-20 son las que definen c_v y c_p, y su interpretación se ofrece en la figura 4-20.

Observe que c_v y c_p se expresan en términos de otras propiedades; de esta manera, deben ser propiedades por sí mismas. Como cualquier otra propiedad, los calores específicos de una sustancia dependen del estado que generalmente se especifica mediante dos propiedades intensivas, independientes. Es decir, la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una sustancia

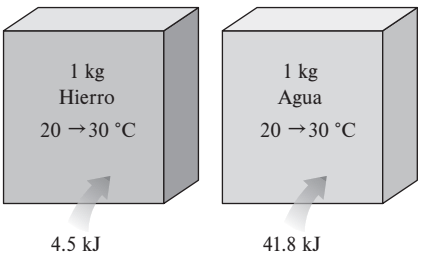


FIGURA 4-17

Se requieren diferentes cantidades de energía para elevar en la misma cantidad la temperatura de distintas sustancias.

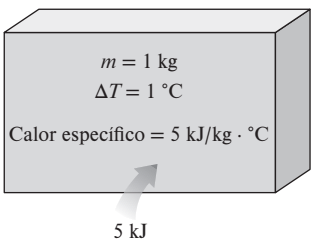


FIGURA 4-18

El calor específico es la energía requerida para elevar la temperatura en un grado de una unidad de masa de una sustancia en una manera especificada.

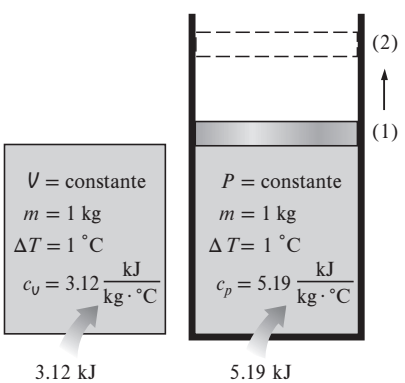


FIGURA 4-19

Calores específicos a volumen y presión constantes c_v y c_p (los valores expresados son para el gas helio).

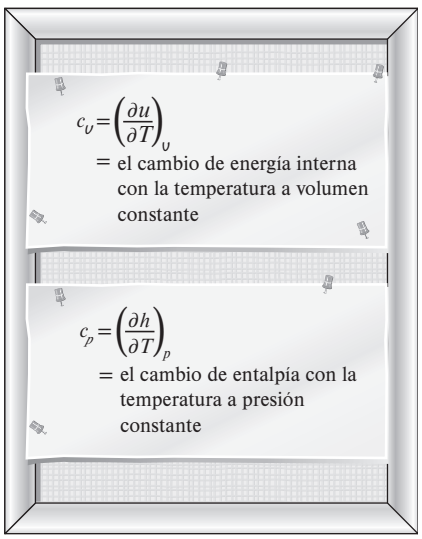

$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v$
= el cambio de energía interna con la temperatura a volumen constante
$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p$
= el cambio de entalpía con la temperatura a presión constante

FIGURA 4-20

Definiciones formales de c_v y c_p.

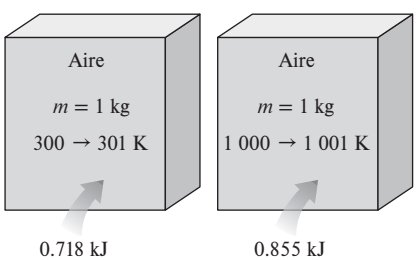


FIGURA 4-21

El calor específico de una sustancia cambia con la temperatura.

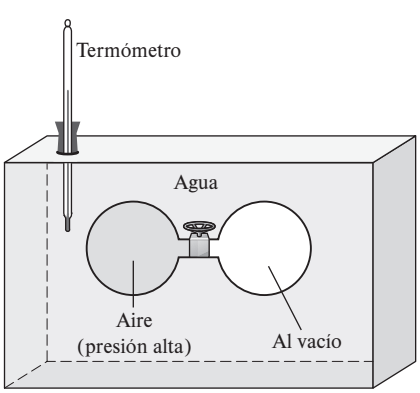


FIGURA 4-22

Esquema del aparato experimental que usó Joule.

difiere a temperaturas y presiones distintas (Fig. 4-21), pero normalmente esta diferencia no es muy grande.

De las ecuaciones 4-19 y 4-20 se pueden hacer algunas observaciones. Una es que son *relaciones de propiedades* y como tales *son independientes del tipo de proceso*; por lo tanto, son válidas para *cualquier* sustancia que experimenta *cualquier* proceso. La única relevancia que tiene c_v en relación con un proceso a volumen constante es que c_v corresponde a la energía transferida hacia un sistema durante un proceso, a volumen constante por unidad de masa, por cada grado que aumenta la temperatura. Así es como se determinan los valores de c_v, lo que originó el nombre de *calor específico a volumen constante*. Del mismo modo, la energía transferida al sistema por unidad de masa y que causa el aumento unitario de temperatura durante un proceso a presión constante es igual a c_p, con lo cual se determinan los valores de c_p y se explica también el origen del nombre de *calor específico a presión constante*.

Otra observación que se puede hacer de las ecuaciones 4-19 y 4-20 es que c_v está relacionado con los cambios de *energía interna* mientras que c_p lo está con los cambios de *entalpía*. De hecho, sería más adecuado definir c_v como *el cambio en la energía interna de una sustancia por cambio unitario de temperatura a volumen constante*. Asimismo, es posible definir c_p como *el cambio en la entalpía de una sustancia por cambio unitario en la temperatura a presión constante*. En otras palabras, c_v es una medida de la variación de energía interna de una sustancia con la temperatura, y c_p es una medida de la variación de entalpía de una sustancia con la temperatura.

Tanto la energía interna como la entalpía de una sustancia se pueden modificar mediante la transferencia de *energía* en cualquier forma, con el calor como una de las posibles formas de ellas. Por lo tanto, el término *energía específica* es quizá más apropiado que el de *calor específico*, lo cual significa que la energía se transfiere (y almacena) en forma de calor.

Una unidad común para los calores específicos es kJ/kg · °C o kJ/kg · K. Observe que ambas unidades son *idénticas* dado que $\Delta T(°C) = \Delta T(K)$, y un cambio de 1 °C en la temperatura es equivalente a un cambio de 1 K. A veces los calores específicos se dan en *base molar*; en este caso se denotan mediante $\bar{c}_v$ y $\bar{c}_p$ y tienen la unidad kJ/kmol · °C o kJ/kmol · K.

4-4 ▪ ENERGÍA INTERNA, ENTALPÍA Y CALORES ESPECÍFICOS DE GASES IDEALES

Se define un gas ideal como aquél cuya temperatura, presión y volumen específico se relacionan mediante

$$Pv = RT$$

Se ha demostrado en forma matemática (capítulo 12) y experimental (Joule, 1843) que para un gas ideal la energía interna es sólo una función de la temperatura. Es decir,

$$u = u(T) \qquad \textbf{(4-21)}$$

En su experimento clásico, Joule sumergió en agua dos recipientes conectados mediante un tubo y una válvula, como se ilustra en la figura 4-22. Al principio, uno de los recipientes contenía aire a una presión alta y el otro estaba al vacío. Cuando se alcanzó el equilibrio térmico, abrió la válvula para permitir el paso de aire de un recipiente al otro hasta que se igualaron las presiones. Joule no observó ningún cambio en la temperatura del agua y supuso que no se trans-

firió calor hacia o desde el aire. Como tampoco se realizó trabajo, concluyó que la energía interna del aire no cambió aun cuando el volumen y la presión sí lo hicieron. Por lo tanto, razonó, la energía interna es una función de la temperatura solamente y no de la presión o del volumen específico. (Joule demostró después que para gases con una desviación significativa respecto al comportamiento de un gas ideal, la energía interna no es sólo una función de la temperatura.)

Con la definición de entalpía y la ecuación de estado de un gas ideal, se tiene

$$\left.\begin{aligned} h &= u + Pv \\ Pv &= RT \end{aligned}\right\} \quad h = u + RT$$

Dado que R es constante y $u = u(T)$, se deduce que la entalpía de un gas ideal es también sólo una función de la temperatura:

$$h = h\,(T) \tag{4-22}$$

Puesto que para un gas ideal u y h dependen únicamente de la temperatura, los calores específicos c_v y c_p dependen también, a lo sumo, sólo de la temperatura. Por lo tanto, a una temperatura dada, u, h, c_v y c_p de un gas ideal tienen valores fijos sin importar el volumen específico o la presión (Fig. 4-23). Así, para gases ideales, las derivadas parciales de las ecuaciones 4-19 y 4-20 se pueden reemplazar por derivadas ordinarias. Entonces, los cambios diferenciales en la energía interna y la entalpía de un gas ideal se pueden expresar como

$$du = c_v(T)\,dT \tag{4-23}$$

y

$$dh = c_p(T)\,dT \tag{4-24}$$

El cambio de energía interna o la entalpía para un gas ideal durante un proceso que pasa del estado 1 al 2 se determina integrando estas ecuaciones:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_1^2 c_v(T)\,dT \qquad (\text{kJ/kg}) \tag{4-25}$$

y

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \int_1^2 c_p(T)\,dT \qquad (\text{kJ/kg}) \tag{4-26}$$

Para llevar a cabo estas integraciones se requiere tener relaciones para c_v y c_p como funciones de la temperatura.

A presiones bajas, los gases reales aproximan su comportamiento al de un gas ideal; por lo tanto, sus calores específicos dependen sólo de la temperatura. Los calores específicos de los gases reales a presiones bajas se llaman *calores específicos de gas ideal* o *calores específicos de presión cero*, y se denotan como c_{p0} y c_{v0}. Las expresiones analíticas exactas para calores específicos de gas ideal, con base en mediciones o cálculos directos de comportamiento estadístico de moléculas, están disponibles y se presentan como polinomios de tercer grado en el apéndice (tabla A-2*c*) para diversos gases. En la figura 4-24 se ofrece una gráfica de $\bar{c}_{p0}(T)$ para algunos gases comunes.

El uso de datos de calores específicos de gas ideal se limita a presiones bajas, pero también se pueden usar y obtener una exactitud razonable a presio-

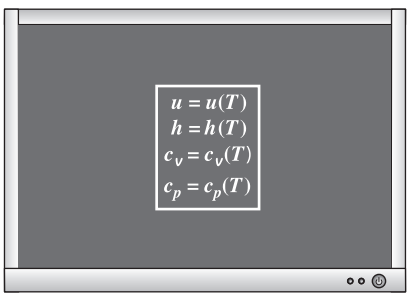


FIGURA 4-23

Para gases ideales, u, h, c_v y c_p varían sólo con la temperatura.

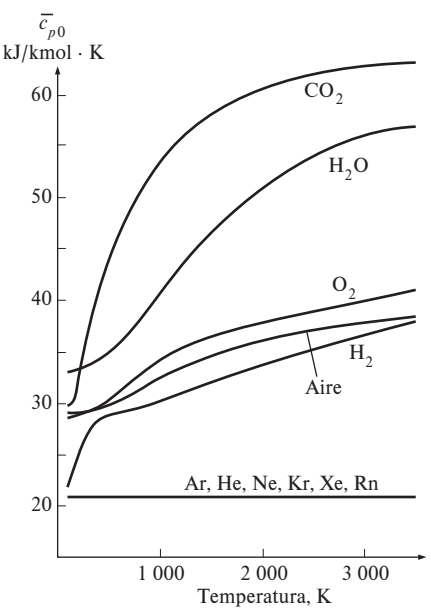


FIGURA 4-24

Calores específicos de gas ideal a presión constante para algunos gases (véase la tabla A-2*c* para ecuaciones de c_p).

Aire

T, K	u, kJ/kg	h, kJ/kg
0	0	0
.	.	.
.	.	.
300	214.07	300.19
310	221.25	310.24
.	.	.
.	.	.

FIGURA 4-25

En la preparación de tablas de gas ideal, se elige 0 K como temperatura de referencia.

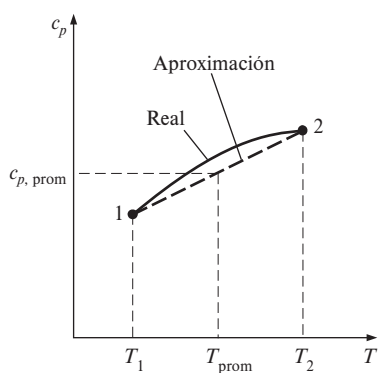


FIGURA 4-26

Para intervalos de temperatura pequeños, se puede suponer que los calores específicos varían en forma lineal con la temperatura.

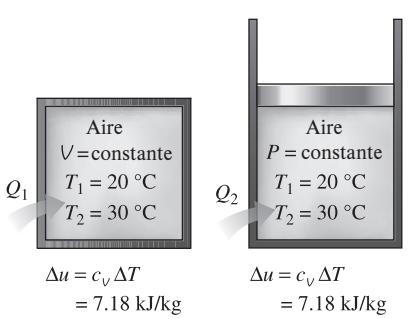


FIGURA 4-27

La relación $\Delta u = c_v \Delta T$ es válida para *cualquier* clase de proceso, a volumen constante o no.

nes moderadamente altas, siempre y cuando el gas no se desvíe de forma significativa del comportamiento de un gas ideal.

Las integraciones en las ecuaciones 4-25 y 4-26 son fáciles pero toman mucho tiempo, de ahí que resulten imprácticas. Para evitar cálculos laboriosos, los datos de u y h han sido tabulados para diversos gases en pequeños intervalos de temperatura. Estas tablas se obtienen eligiendo un punto de referencia arbitrario y llevando a cabo las integraciones en las ecuaciones 4-25 y 4-26 con el estado 1 como el de referencia. En las tablas de gas ideal presentadas en el apéndice, cero kelvin se elige como el estado de referencia, y tanto la entalpía como la energía interna tienen asignados valores cero en ese estado (Fig. 4-25). La elección del estado de referencia no tiene efecto sobre los cálculos de Δu o Δh. Los datos de u y h se dan en kJ/kg para el aire (tabla A-17) y comúnmente en kJ/kmol para otros gases. Para el análisis termodinámico de las reacciones químicas la unidad kJ/kmol es muy conveniente.

De la figura 4-24 se pueden hacer algunas observaciones. Una es que los calores específicos de gases con moléculas complejas (moléculas con dos o más átomos) son más altos y se incrementan con la temperatura. También, la variación de los calores específicos con la temperatura es uniforme y se puede aproximar como lineal en intervalos pequeños de temperatura (algunos cientos de grados o menos). Por lo tanto, las funciones de calor específico de las ecuaciones 4-25 y 4-26 se pueden reemplazar por valores promedio constantes de calores específicos. Entonces, al llevar a cabo las integraciones en estas ecuaciones, se obtiene

$$u_2 - u_1 = c_{v,\text{prom}}(T_2 - T_1) \qquad \textbf{(kJ/kg)} \qquad \textbf{(4-27)}$$

y

$$h_2 - h_1 = c_{p,\text{prom}}(T_2 - T_1) \qquad \textbf{(kJ/kg)} \qquad \textbf{(4-28)}$$

Los valores de calores específicos para algunos gases comunes se listan como una función de la temperatura en la tabla A-2*b*. Los calores específicos promedio $c_{p,\text{prom}}$ y $c_{v,\text{prom}}$ se evalúan de esta tabla a la temperatura promedio $(T_1 + T_2)/2$, como se muestra en la figura 4-26. Si no se conoce la temperatura final T_2, los calores específicos se pueden evaluar en T_1 o en la temperatura promedio anticipada. Entonces T_2 se determina usando estos valores de calor específico. Si es necesario, el valor de T_2 se puede mejorar evaluando los calores específicos en la nueva temperatura promedio.

Otra forma de determinar los calores específicos promedio es evaluarlos en T_1 y T_2 y luego sacar su promedio. En general ambos métodos dan resultados razonablemente buenos, y uno no es necesariamente mejor que el otro.

Otra observación que se puede hacer a partir de la figura 4-24 es que los calores específicos de gas ideal para *gases monoatómicos* como argón, neón y helio permanecen constantes en todo el intervalo de temperatura. Así, Δu y Δh de gases monoatómicos se determinan con facilidad de las ecuaciones 4-27 y 4-28.

Observe que las relaciones Δu y Δh antes dadas no están restringidas a alguna clase de proceso, sino que son válidas para todos los procesos. La presencia del calor específico a volumen constante c_v en una ecuación no debe hacer pensar que esta ecuación es válida sólo para un proceso a volumen constante; por el contrario, la relación $\Delta u = c_{v,\text{prom}}\,\Delta T$ es válida para *cualquier* gas ideal que experimenta *cualquier* proceso (Fig. 4-27). Un argumento similar se puede presentar para c_p y Δh.

En resumen, hay tres formas de determinar los cambios de energía interna y entalpía para gases ideales (Fig. 4-28):

1. Mediante los datos tabulados de u y h. Ésta es la forma más sencilla y exacta cuando están fácilmente disponibles las tablas.
2. Por medio de las relaciones c_v o c_p como una función de la temperatura para después llevar a cabo las integraciones. Esto es muy inconveniente para cálculos manuales, pero bastante deseable para cálculos por computadora. Los resultados obtenidos son muy exactos.
3. Con el empleo de calores específicos promedio. Esto es muy simple y de hecho muy conveniente cuando no se encuentran disponibles las tablas de propiedades. Los resultados que se obtienen son razonablemente exactos si el intervalo de temperatura no es muy grande.

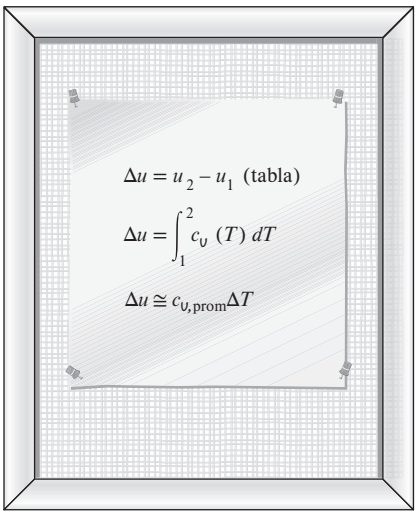


FIGURA 4-28
Tres formas de calcular Δu.

Relaciones de calores específicos de gases ideales

Una relación especial entre c_p y c_v para gases ideales se obtiene al derivar la relación $h = u + RT$, lo cual produce

$$dh = du + R\,dT$$

Si se reemplaza dh por $c_p\,dT$ y du por $c_v\,dT$, y se divide la expresión resultante entre dT, se obtiene

$$c_p = c_v + R \qquad (\text{kJ/kg} \cdot \text{K}) \tag{4-29}$$

Ésta es una relación importante para gases ideales porque permite determinar c_v si se conocen c_p y la constante del gas R.

Cuando los calores específicos aparecen en base molar, debe reemplazarse R en la ecuación anterior por la constante universal de los gases R_u (Fig. 4-29).

$$\bar{c}_p = \bar{c}_v + R_u \qquad (\text{kJ/kmol} \cdot \text{K}) \tag{4-30}$$

En este punto, se introduce otra propiedad del gas ideal conocida como **relación de calores específicos** k, definida como

$$k = \frac{c_p}{c_v} \tag{4-31}$$

La relación de calores específicos varía también con la temperatura, pero su variación es muy pequeña. Para gases monoatómicos, su valor es en esencia una constante en 1.667. Muchos gases diatómicos, incluso el aire, tienen una relación de calores específicos de alrededor de 1.4 a temperatura ambiente.

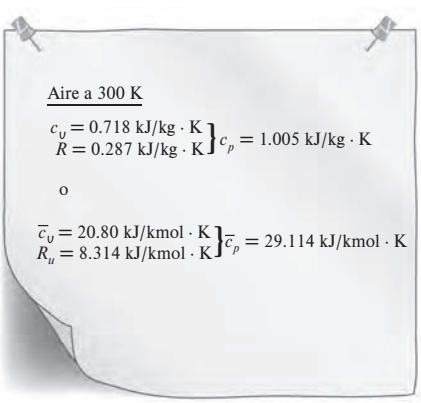


FIGURA 4-29
El c_p de un gas ideal se puede determinar de c_v y R.

EJEMPLO 4-7 **Evaluación del Δu de un gas ideal**

Aire a 300 K y 200 kPa se calienta a presión constante hasta 600 K. Determine el cambio de energía interna del aire por unidad de masa, con *a*) datos de la tabla para el aire (tabla A-17), *b*) la forma de función del calor específico (tabla A-2*c*) y *c*) el valor del calor específico promedio (tabla A-2*b*).

SOLUCIÓN El cambio de energía interna del aire se determinará en tres formas distintas.

Suposición En condiciones específicas se puede considerar que el aire es un gas ideal porque se encuentra a alta temperatura y baja presión en relación con sus valores de punto crítico.

Análisis El cambio de energía interna Δu de gases ideales depende sólo de las temperaturas inicial y final y no del tipo de proceso. Así, la siguiente solución es válida para cualquier clase de proceso.

a) Una forma de determinar el cambio de energía interna del aire es leer los valores de u en T_1 y T_2 de la tabla A-17 y calcular la diferencia:

$$u_1 = u_{\text{a 300 K}} = 214.07 \text{ kJ/kg}$$
$$u_2 = u_{\text{a 600 K}} = 434.78 \text{ kJ/kg}$$

Así,

$$\Delta u = u_2 - u_1 = (434.78 - 214.07) \text{ kJ/kg} = \mathbf{220.71 \text{ kJ/kg}}$$

b) El $\bar{c}_p(T)$ del aire se da en la tabla A-2c en la forma de un polinomio de tercer grado como

$$\bar{c}_p(T) = a + bT + cT^2 + dT^3$$

donde $a = 28.11$, $b = 0.1967 \times 10^{-2}$, $c = 0.4802 \times 10^{-5}$ y $d = -1.966 \times 10^{-9}$. De la ecuación 4-30,

$$\bar{c}_v(T) = \bar{c}_p - R_u = (a - R_u) + bT + cT^2 + dT^3$$

De la ecuación 4-25,

$$\Delta \bar{u} = dT \int_1^2 \bar{c}_v(T)\, dT = \int_{T_1}^{T_2} [(a - R_u) + bT + cT^2 + dT^3]\, dT$$

Al efectuar la integración y sustituir los valores se obtiene

$$\Delta \bar{u} = 6\,447 \text{ kJ/kmol}$$

El cambio de energía interna por unidad de masa se determina dividiendo este valor entre la masa molar del aire (tabla A-1):

$$\Delta u = \frac{\Delta \bar{u}}{M} = \frac{6\,447 \text{ kJ/kmol}}{28.97 \text{ kg/kmol}} = \mathbf{222.5 \text{ kJ/kg}}$$

lo que difiere del valor tabulado en 0.8 por ciento.

c) El valor promedio del calor específico a volumen constante $c_{v,\text{prom}}$ se determina de la tabla A-2*b* a la temperatura promedio de $(T_1 + T_2)/2 = 450$ K como

$$c_{v,\text{prom}} = c_{v \text{ a } 450 \text{ K}} = 0.733 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

Así,

$$\Delta u = c_{v,\text{prom}}(T_2 - T_1) = (0.733 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})[(600 - 300)\text{K}]$$
$$= \mathbf{220 \text{ kJ/kg}}$$

Comentario Esta respuesta difiere del valor tabulado (220.71 kJ/kg) en sólo 0.4 por ciento. Esta estrecha concordancia no sorprende porque la suposición de que c_v varía de manera lineal con la temperatura es razonable a intervalos de temperatura de sólo unos cientos de grados. Si se hubiera usado el valor de c_v en $T_1 = 300$ K en lugar de T_{prom}, el resultado sería 215.4 kJ/kg, el cual tiene un error de casi 2 por ciento. Errores de esta magnitud son aceptables en ingeniería para la mayor parte de los propósitos.

EJEMPLO 4-8 Calentamiento de un gas en un recipiente por agitación

Un recipiente rígido aislado contiene al inicio 1.5 lbm de helio a 80 °F y 50 psia. Dentro del recipiente hay una rueda de paletas que opera con una potencia nominal de 0.02 hp durante 30 min. Determine *a*) la temperatura final y *b*) la presión final del gas helio.

SOLUCIÓN Un recipiente aislado contiene gas helio, el cual es agitado mediante una rueda de paletas. Se determinarán *a*) la temperatura final y *b*) la presión final del gas helio.

Suposiciones **1** El helio es un gas ideal ya que está a muy alta temperatura en relación con su valor de punto crítico de –451 °F. **2** Se pueden usar los calores específicos constantes para el helio. **3** El sistema es estacionario, por lo tanto, los cambios de energía cinética y potencial son cero, $\Delta EC = \Delta EP = 0$ y $\Delta E = \Delta U$. **4** El volumen del recipiente es constante, de modo que no hay trabajo de frontera. **5** El sistema es adiabático y, en consecuencia, no hay transferencia de calor.

Análisis Se toma el contenido del recipiente como el *sistema* (Fig. 4-30), el cual es *cerrado* porque ninguna masa cruza sus fronteras durante el proceso. Se observa que se realiza trabajo de flecha sobre el sistema.

a) La cantidad de trabajo que la rueda de paletas hace sobre el sistema es

$$W_{\text{flecha}} = \dot{W}_{\text{flecha}}\,\Delta t = (0.02\ \text{hp})\,(0.5\ \text{h})\left(\frac{2\,545\ \text{Btu/h}}{1\ \text{hp}}\right) = 25.45\ \text{Btu}$$

Bajo las suposiciones y observaciones expresadas, el balance de energía en el sistema se puede expresar como

$$\underbrace{E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}}}_{\substack{\text{Transferencia neta de energía}\\ \text{por calor, trabajo y masa}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Cambio en las energías interna,}\\ \text{cinética, potencial, etcétera}}}$$

$$W_{\text{flecha,entrada}} = \Delta U = m(u_2 - u_1) = mc_{v,\text{prom}}(T_2 - T_1)$$

Como se señaló antes, los calores específicos de gas ideal para gases monoatómicos (el helio es uno de ellos) son constantes. El valor de c_v para el helio se determina de la tabla A-2E*a* como $c_v = 0.753$ Btu/lbm · °F. Al sustituir esta y otras cantidades conocidas en la ecuación anterior se obtiene

$$25.45\ \text{Btu} = (1.5\ \text{lbm})(0.753\ \text{Btu/lbm}\cdot{}^\circ\text{F})(T_2 - 80\ ^\circ\text{F})$$

$$T_2 = \mathbf{102.5\ ^\circ F}$$

b) La presión final se determina de la relación de gas ideal

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$$

donde V_1 y V_2 son idénticos y se cancelan; entonces, la presión final se convierte en

$$\frac{50\ \text{psia}}{(80 + 460)\ \text{R}} = \frac{P_2}{(102.5 + 460)\ \text{R}}$$

$$P_2 = \mathbf{52.1\ psia}$$

Comentario Note que la presión en la relación de gas ideal es siempre la presión absoluta.

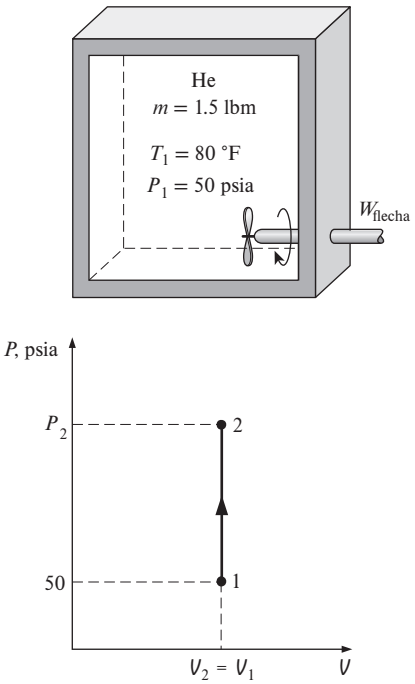


FIGURA 4-30

Esquema y diagrama *P-V* para el ejemplo 4-8.

EJEMPLO 4-9 Calentamiento de un gas mediante un calentador de resistencia

Un dispositivo que consta de cilindro-émbolo contiene inicialmente 0.5 m^3 de gas nitrógeno a 400 kPa y 27 °C. Dentro del dispositivo se enciende un calentador eléctrico con lo cual pasa una corriente de 2 A durante cinco minutos desde una fuente de 120 V. El nitrógeno se expande a presión constante y ocurre una pérdida de calor de 2800 J durante el proceso. Determine la temperatura final del nitrógeno.

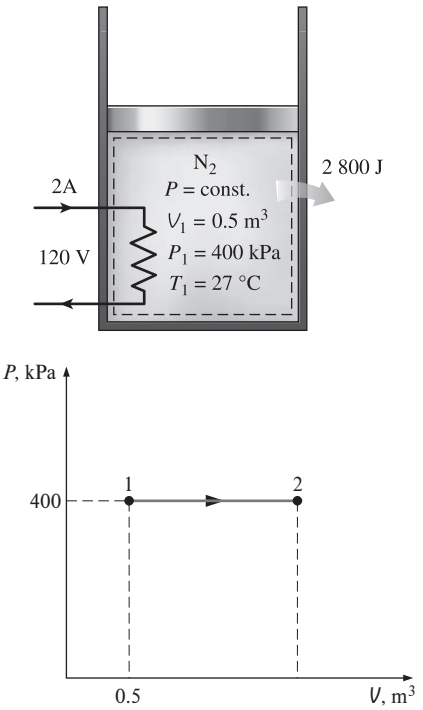


FIGURA 4-31

Esquema y diagrama *P-V* para el ejemplo 4-9.

SOLUCIÓN En un dispositivo de cilindro-émbolo se calienta gas nitrógeno mediante un calentador de resistencia eléctrica. La sustancia se expande a presión constante mientras se pierde algo de calor. Se determinará la temperatura final del nitrógeno.

Suposiciones **1** El nitrógeno es un gas ideal porque está a temperatura alta y presión baja en relación con sus valores de punto crítico de –147 °C y 3.39 MPa. **2** El sistema es estacionario y, por lo tanto, los cambios de energía potencial y cinética son cero, $\Delta EC = \Delta EP = 0$ y $\Delta E = \Delta U$. **3** La presión permanece constante durante el proceso, de modo que $P_2 = P_1$. **4** El nitrógeno tiene calores específicos constantes a temperatura ambiente.

Análisis Se considera el contenido del cilindro como el *sistema* (Fig. 4-31), el cual es *cerrado* porque ninguna masa cruza sus fronteras durante el proceso. Se observa que comúnmente un dispositivo de cilindro-émbolo se relaciona con una frontera móvil y, por lo tanto, con trabajo de frontera, W_b. También, se pierde calor del sistema y se hace trabajo eléctrico W_e sobre el sistema.

Primero, se determina el trabajo eléctrico realizado sobre el nitrógeno:

$$W_e = \mathbf{V} I\,\Delta t = (120\ \text{V})(2\ \text{A})(5 \times 60\ \text{s})\left(\frac{1\ \text{kJ/s}}{1\,000\ \text{VA}}\right) = 72\ \text{kJ}$$

La masa del nitrógeno se determina a partir de la relación de gas ideal:

$$m = \frac{P_1 V_1}{RT_1} = \frac{(400\ \text{kPa})\,(0.5\ \text{m}^3)}{(0.297\ \text{kPa}\cdot\text{m}^3/\text{kg}\cdot\text{K})\,(300\ \text{K})} = 2.245\ \text{kg}$$

Bajo las suposiciones y observaciones consideradas, el balance de energía sobre el sistema se puede expresar como

$$\underbrace{E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}}}_{\substack{\text{Transferencia neta de energía}\\ \text{por calor, trabajo y masa}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Cambio en las energías interna,}\\ \text{cinética, potencial, etcétera}}}$$

$$W_{e,\text{entrada}} - Q_{\text{salida}} - W_{b,\text{salida}} = \Delta U$$

$$W_{e,\text{entrada}} - Q_{\text{salida}} = \Delta H = m(h_2 - h_1) = mc_p(T_2 - T_1)$$

dado que $\Delta U + W_b = \Delta H$ para un sistema cerrado que experimenta una expansión o compresión en cuasiequilibrio a presión constante. De la tabla A-2*a*, $c_p = 1.039$ kJ/kg · K para el nitrógeno a temperatura ambiente. La única cantidad desconocida en la ecuación anterior es T_2, y se encuentra como

$$72\ \text{kJ} - 2.8\ \text{kJ} = (2.245\ \text{kg})(1.039\ \text{kJ/kg}\cdot\text{K})(T_2 - 27\ ^\circ\text{C})$$

$$T_2 = 56.7\ ^\circ\text{C}$$

Comentario Observe que este problema se podría resolver también si se determina el trabajo de frontera y el cambio de energía interna en vez del cambio de entalpía.

EJEMPLO 4-10 Calentamiento de un gas a presión constante

Un dispositivo de cilindro-émbolo contiene al inicio aire a 150 kPa y 27 °C. En este estado, el émbolo descansa sobre un par de topes, como se ilustra en la figura 4-32, y el volumen encerrado es de 400 L. La masa del émbolo es tal que se requiere una presión de 350 kPa para moverlo. Se calienta el aire hasta duplicar su volumen. Determine *a*) la temperatura final, *b*) el trabajo que realiza el aire y *c*) el calor total transferido al aire.

SOLUCIÓN En un dispositivo de cilindro-émbolo provisto de dos topes se calienta aire hasta duplicar su volumen. Se determinarán la temperatura final, el trabajo realizado y la transferencia de calor total.

Suposiciones **1** El aire es un gas ideal porque está a temperatura alta y baja presión en relación con sus valores de punto crítico. **2** El sistema es estacionario; por lo tanto, los cambios de energía cinética y potencial son cero, $\Delta EC = \Delta EP = 0$ y $\Delta E = \Delta U$. **3** El volumen permanece constante hasta que el émbolo comienza a moverse, después la presión permanece constante durante el proceso. **4** No hay trabajo de flecha, eléctrico o de otro tipo.

Análisis Se toma el contenido del cilindro como el *sistema* (Fig. 4-32), el cual es *cerrado* puesto que ninguna masa cruza sus fronteras durante el proceso. Se observa que comúnmente un dispositivo de cilindro-émbolo tiene relación con una frontera móvil y, por lo tanto, con trabajo de frontera, W_b. Asimismo, el sistema realiza trabajo de frontera y se transfiere calor al sistema.

a) La temperatura final se determina fácilmente por medio de la relación del gas ideal entre los estados 1 y 3 en la siguiente forma:

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_3V_3}{T_3} \longrightarrow \frac{(150\ \text{kPa})(V_1)}{300\ \text{K}} = \frac{(350\ \text{kPa})(2V_1)}{T_3}$$

$$T_3 = \mathbf{1\,400\ K}$$

b) El trabajo realizado se podría determinar por integración, pero en este caso es mucho más fácil hacerlo a partir del área bajo la curva del proceso, en un diagrama *P-V* el cual se muestra en la figura 4-32:

$$A = (V_2 - V_1)P_2 = (0.4\ \text{m}^3)(350\ \text{kPa}) = 140\ \text{m}^3 \cdot \text{kPa}$$

Por consiguiente,

$$W_{13} = \mathbf{140\ kJ}$$

El sistema realiza trabajo (para elevar el émbolo y expulsar el aire atmosférico de su camino), por lo tanto se trata de producción de trabajo.

c) Bajo las suposiciones y observaciones consideradas, el balance de energía en el sistema entre los estados inicial y final (proceso 1-3) se puede expresar como

$$\underbrace{E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}}}_{\substack{\text{Transferencia neta de energía}\\ \text{por calor, trabajo y masa}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Cambio en las energías interna,}\\ \text{cinética, potencial, etcétera}}}$$

$$Q_{\text{entrada}} - W_{b,\text{salida}} = \Delta U = m(u_3 - u_1)$$

La masa del sistema se determina a partir de la relación de gas ideal:

$$m = \frac{P_1V_1}{RT_1} = \frac{(150\ \text{kPa})(0.4\ \text{m}^3)}{(0.287\ \text{kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{K})(300\ \text{K})} = 0.697\ \text{kg}$$

Las energías internas se determinan de la tabla del aire (tabla A-17) como

$$u_1 = u_{\text{a 300 K}} = 214.07\ \text{kJ/kg}$$

$$u_3 = u_{\text{a 1 400 K}} = 1\,113.52\ \text{kJ/kg}$$

Así,

$$Q_{\text{entrada}} - 140\ \text{kJ} = (0.697\ \text{kg})\,[(1\,113.52 - 214.07)\ \text{kJ/kg}]$$

$$Q_{\text{entrada}} = \mathbf{767\ kJ}$$

Comentario El signo positivo asegura que se transfiere calor al sistema.

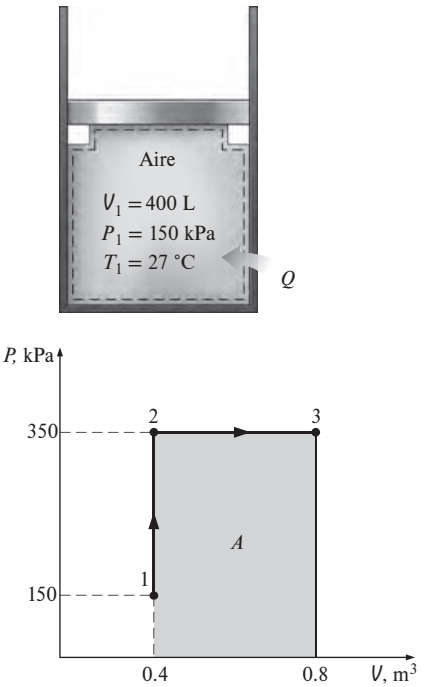


FIGURA 4-32
Esquema y diagrama *P-V* para el ejemplo 4-10.

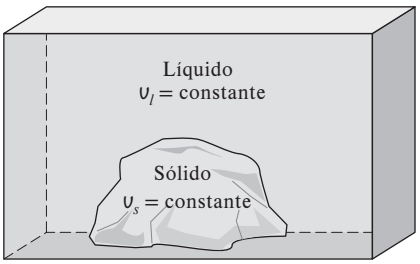


FIGURA 4-33

Los volúmenes específicos de sustancias incompresibles permanecen constantes durante un proceso.

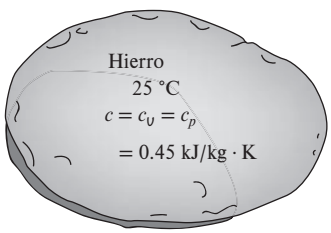


FIGURA 4-34

Los valores c_v y c_p de sustancias incompresibles son idénticos y se denotan mediante c.

4-5 ▪ ENERGÍA INTERNA, ENTALPÍA Y CALORES ESPECÍFICOS DE SÓLIDOS Y LÍQUIDOS

Una sustancia cuyo volumen específico (o densidad) es constante se llama **sustancia incompresible**. Los volúmenes específicos de sólidos y líquidos en esencia permanecen constantes durante un proceso (Fig. 4-33); por lo tanto, líquidos y sólidos se pueden considerar como sustancias incompresibles sin sacrificar mucho en precisión. Se debe entender que la suposición de volumen constante implica que la energía relacionada con el cambio de volumen es insignificante en comparación con otras formas de energía. De lo contrario, esta suposición sería ridícula para estudiar el esfuerzo térmico en sólidos (causado por el cambio de volumen con la temperatura) o analizar termómetros de líquido contenido en vidrio.

Se puede mostrar matemáticamente que (véase el capítulo 12) los calores específicos a volumen y presión constantes son idénticos para sustancias incompresibles (Fig. 4-34). Entonces, para sólidos y líquidos, los subíndices en c_p y c_v se eliminan, y ambos calores específicos se pueden representar mediante un solo símbolo c. Es decir,

$$c_p = c_v = c \tag{4-32}$$

Esto se podría deducir también de las definiciones físicas de calores específicos a volumen y presión constantes. Los valores de calores específicos para diversos líquidos y sólidos comunes se ofrecen en la tabla A-3.

Cambios de energía interna

Al igual que los de gases ideales, los calores específicos de sustancias incompresibles dependen sólo de la temperatura. Así, las diferenciales parciales en la ecuación de definición de c_v se pueden reemplazar por diferenciales ordinarias, que producen

$$du = c_v\, dT = c\,(T)dT \tag{4-33}$$

El cambio de energía interna entre los estados 1 y 2 se obtiene por integración:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_1^2 c\,(T)\,dT \qquad (\text{kJ/kg}) \tag{4-34}$$

La variación del calor específico c con la temperatura se debe conocer antes de llevar a cabo esta integración. Para pequeños intervalos de temperatura, un valor de c a la temperatura promedio se puede usar y tratar como una constante, de lo que se obtiene

$$\Delta u \cong c_{\text{prom}}(T_2 - T_1) \qquad (\text{kJ/kg}) \tag{4-35}$$

Cambios de entalpía

Si se emplea la definición de entalpía $h = u + Pv$ y observando que v = constante, la forma diferencial del cambio de entalpía de sustancias incompresibles se determina mediante derivación, como

$$dh = du + v\,dP + P\,\overset{0}{\cancel{dv}} = du + v\,dP \tag{4-36}$$

Al integrar,

$$\Delta h = \Delta u + v\,\Delta P \cong c_{\text{prom}}\,\Delta T + v\,\Delta P \qquad (\text{kJ/kg}) \tag{4-37}$$

Para *sólidos*, el término $\upsilon\,\Delta P$ es insignificante, por lo tanto $\Delta h \cong \Delta u \cong c_{\text{prom}}\Delta T$. Para *líquidos*, comúnmente se encuentran dos casos especiales:

1. *Procesos a presión constante*, como en los calentadores ($\Delta P = 0$): $\Delta h = \Delta u \cong c_{\text{prom}}\Delta T$
2. *Procesos a temperatura constante*, como en las bombas ($\Delta T = 0$): $\Delta h = \upsilon\,\Delta P$

Para un proceso que ocurre entre los estados 1 y 2, la última relación se puede expresar como $h_2 - h_1 = \upsilon(P_2 - P_1)$. Si se toma el estado 2 como el estado de líquido comprimido a T y P dadas, así como el estado 1 de líquido saturado a la misma temperatura, es posible expresar la entalpía del líquido comprimido como

$$h_{a\,P,T} \cong h_{f\,a\,T} + \upsilon_{f\,a\,T}(P - P_{\text{sat a }T}) \qquad \textbf{(4-38)}$$

como se analizó en el capítulo 3. Ésta es una mejora sobre la suposición de que la entalpía del líquido comprimido se podría tomar como h_f a la temperatura dada (es decir, $h_{a\,P,T} \cong h_{f\,a\,T}$); sin embargo, la contribución del último término suele ser muy pequeña y se ignora. (Observe que a presiones y temperaturas altas, la ecuación 4-38 podría sobrecorregir la entalpía y dar como resultado un error más grande que la aproximación $h \cong h_{f\,a\,T}$.)

EJEMPLO 4-11 **Entalpía de un líquido comprimido**

Determine la entalpía del agua líquida a 100 °C y 15 MPa *a*) usando tablas de líquido comprimido, *b*) aproximándola como un líquido saturado y *c*) usando la corrección dada por la ecuación 4-38.

SOLUCIÓN Se determinará la entalpía del agua líquida de manera exacta y aproximada.

Análisis A 100 °C, la presión de saturación del agua es de 101.42 kPa, y como $P > P_{\text{sat}}$, el agua existe como un líquido comprimido en el estado especificado.

a) De las tablas de líquido comprimido se lee

$$\left.\begin{aligned} P &= 15\ \text{MPa} \\ T &= 100\ ^\circ\text{C} \end{aligned}\right\} \quad h = \mathbf{430.39\ kJ/kg} \qquad \text{(Tabla A- 7)}$$

Éste es el valor exacto.

b) Considerando el líquido comprimido como uno saturado a 100 °C, como suele hacerse, se obtiene

$$h \cong h_{f\,a\,100\,^\circ\text{C}} = \mathbf{419.17\ kJ/kg}$$

Este valor tiene un error de alrededor de 2.6 por ciento.

c) De la ecuación 4-38,

$$\begin{aligned} h_{a\,P,T} &\cong h_{f\,a\,T} + \upsilon_{f\,a\,T}(P - P_{\text{sat a }T}) \\ &= (419.17\ \text{kJ/kg}) + (0.001\ \text{m}^3/\text{kg})[(15\,000 - 101.42)\ \text{kPa}]\left(\frac{1\ \text{kJ}}{1\ \text{kPa}\cdot\text{m}^3}\right) \\ &= \mathbf{434.07\ kJ/kg} \end{aligned}$$

Comentario Note que el término de corrección redujo el error de 2.6 a casi 1 por ciento en este caso. Sin embargo, esta mejora en precisión con frecuencia no vale la pena.

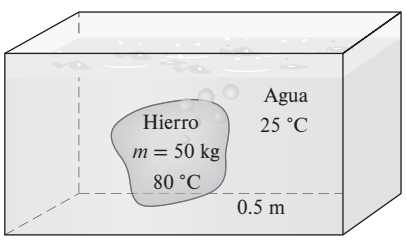


FIGURA 4-35
Esquema para el ejemplo 4-12.

EJEMPLO 4-12 **Enfriamiento con agua de un bloque de hierro**

Un bloque de hierro de 50 kg a 80 °C se sumerge en un recipiente aislado que contiene 0.5 m^3 de agua líquida a 25 °C. Determine la temperatura cuando se alcanza el equilibrio térmico.

SOLUCIÓN En un recipiente aislado con agua se sumerge un bloque de hierro. Se determinará la temperatura final cuando se alcanza el equilibrio térmico.

Suposiciones **1** Tanto el agua como el bloque de hierro son sustancias incompresibles. **2** Para el agua y el hierro se pueden usar calores específicos constantes a temperatura ambiente. **3** El sistema es estacionario, por lo tanto los cambios de energía cinética y potencial son cero, $\Delta EC = \Delta EP = 0$ y $\Delta E = \Delta U$. **4** No hay trabajo eléctrico, de flecha o de otro tipo. **5** El sistema está bien aislado; por consiguiente, no hay transferencia de calor.

Análisis Se toma todo el contenido del recipiente como el *sistema* (Fig. 4-35), el cual es *cerrado* puesto que ninguna masa cruza sus fronteras durante el proceso. Se observa que el volumen de un recipiente rígido es constante, de modo que no hay trabajo de frontera. El balance de energía se puede expresar como

$$\underbrace{E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}}}_{\substack{\text{Transferencia neta de energía}\\ \text{por calor, trabajo y masa}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Cambio en las energías interna,}\\ \text{cinética, potencial, etcétera}}}$$

$$0 = \Delta U$$

La energía interna total U es una propiedad extensiva, por lo tanto se puede expresar como la suma de las energías internas de las partes del sistema. Entonces, el cambio de energía interna total del sistema es

$$\Delta U_{\text{sistema}} = \Delta U_{\text{hierro}} + \Delta U_{\text{agua}} = 0$$

$$[mc\,(T_2 - T_1)]_{\text{hierro}} + [mc\,(T_2 - T_1)]_{\text{agua}} = 0$$

El volumen específico del agua líquida en o cerca de la temperatura ambiente se toma como 0.001 m^3/kg; entonces la masa del agua es

$$m_{\text{agua}} = \frac{V}{v} = \frac{0.5\ \text{m}^3}{0.001\ \text{m}^3/\text{kg}} = 500\ \text{kg}$$

Los calores específicos del hierro y el agua se determinan de la tabla A-3 como $c_{\text{hierro}} = 0.45$ kJ/kg · °C y $c_{\text{agua}} = 4.18$ kJ/kg · °C. Al sustituir estos valores en la ecuación de energía se obtiene

$$(50\ \text{kg})(0.45\ \text{kJ/kg}\cdot{}^\circ\text{C})(T_2 - 80\ ^\circ\text{C}) + (500\ \text{kg})(4.18\ \text{kJ/kg}\cdot{}^\circ\text{C})(T_2 - 25\ ^\circ\text{C}) = 0$$

$$T_2 = 25.6\ ^\circ\text{C}$$

De esta manera, cuando se establece el equilibrio térmico, tanto el agua como el hierro estarán a 25.6 °C.

Comentario El pequeño aumento en la temperatura del agua se debe a su gran masa y a su calor específico grande.

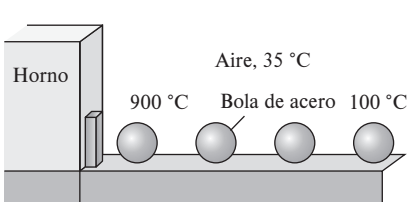


FIGURA 4-36
Esquema para el ejemplo 4-13.

EJEMPLO 4-13 **Enfriamiento de bolas de acero al carbón en aire**

Bolas de acero al carbón ($\rho = 7\,833$ kg/m^3 y $c_p = 0.465$ kJ/kg · °C) de 8 mm de diámetro se recuecen calentándolas primero a 900 °C en un horno, y luego dejándolas enfriar lentamente a 100 °C en aire ambiente a 35 °C, como se muestra en la figura 4-36. Si se van a recocer 2 500 bolas por hora, determine la tasa de transferencia de calor de las bolas al aire ambiente.

SOLUCIÓN Las bolas de acero al carbón se van a recocer a razón de 2 500/h calentándolas primero y luego dejándolas enfriar lentamente en aire ambiente a una tasa especificada. Se va a determinar la tasa total de transferencia de calor de las bolas al aire ambiente.

Suposiciones **1** Las propiedades térmicas de las bolas son constantes. **2** Las energías cinética y potencial no cambian. **3** Las bolas están a una temperatura uniforme al final del proceso.

Propiedades La densidad y el calor específico de las bolas son $\rho = 7\ 833$ kg/m^3 y $c_p = 0.465$ kJ/kg · °C.

Análisis Consideramos una sola bola como sistema. El balance de energía para este sistema cerrado se puede expresar como

$$\underbrace{E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}}}_{\substack{\text{Transferencia neta de energía}\\ \text{por calor, trabajo y masa}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Cambio en las energías interna,}\\ \text{cinética, potencial, etcétera}}}$$

$$-Q_{\text{salida}} = \Delta U_{\text{bola}} = m(u_2 - u_1)$$
$$Q_{\text{salida}} = mc(T_1 - T_2)$$

La cantidad de calor transferida por una sola bola es

$$m = \rho V = \rho \frac{\pi D^3}{6} = (7833\ \text{kg/m}^3)\frac{\pi(0.008\ \text{m})^3}{6} = 0.00210\ \text{kg}$$

$$Q_{\text{salida}} = mc(T_1 - T_2) = (0.00210\ \text{kg})(0.465\ \text{kJ/kg} \cdot °\text{C})(900 - 100)°\text{C}$$
$$= 0.781\ \text{kJ (por bola)}$$

Entonces la tasa de transferencia de calor total de las bolas al aire ambiente es

$$\dot{Q}_{\text{salida}} = \dot{n}_{\text{bola}} Q_{\text{salida}} = (2\ 500\ \text{bola/h})(0.781\ \text{kJ/bola}) = 1\ 953\ \text{kJ/h} = \mathbf{542\ W}$$

Comentario Para sólidos y líquidos, los calores específicos a volumen y presión constantes son idénticos y se pueden representar con un solo símbolo *c*. Sin embargo, se acostumbra utilizar el símbolo c_p para el calor específico de sustancias incompresibles.

TEMA DE INTERÉS ESPECIAL* Aspectos termodinámicos de los sistemas biológicos

Una excitante e importante área de aplicación de la termodinámica es en los sistemas biológicos, los cuales son sitios de transferencia de energía y de procesos de transformación bastante complejos e intrigantes. Los sistemas biológicos no se encuentran en equilibrio termodinámico, por lo tanto se dificulta su análisis. A pesar de su complejidad, los sistemas biológicos están formados principalmente por cuatro elementos sencillos: hidrógeno, oxígeno, carbono y nitrógeno. De todos los átomos del cuerpo humano, el hidrógeno representa 63 por ciento, el oxígeno 25.5, el carbono 9.5 y el nitrógeno 1.4 por ciento. El resto, 0.6 por ciento, corresponde a otros 20 elementos esenciales para la vida. En masa, alrededor de 72 por ciento del cuerpo humano es agua.

Los bloques básicos de los organismos vivos son las *células*, que son semejantes a fábricas diminutas en las que se llevan a cabo funciones vitales para la supervivencia de los organismos. Un sistema biológico puede ser tan sencillo como una sola célula. El cuerpo humano contiene alrededor de 100 billones de células con un diámetro promedio de 0.01 mm. La membrana de la célula

* Se puede omitir esta sección sin que se pierda continuidad.

FIGURA 4-37

Cuando está en reposo, en promedio una persona disipa energía hacia los alrededores a una tasa de 84 W.

© Janis Christie/Getty Images RF

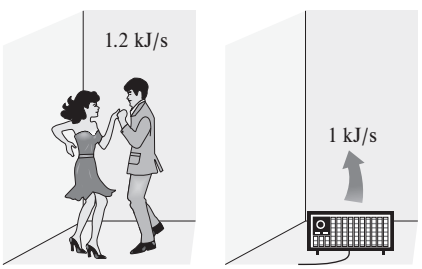


FIGURA 4-38

Dos personas bailando rápido proveen más energía a una habitación que un calentador de resistencia eléctrica de 1 kW.

es una pared semipermeable que permite el paso de algunas sustancias mientras que excluye a otras.

En una célula representativa ocurren miles de reacciones químicas cada segundo, tiempo durante el cual se descomponen algunas moléculas, se libera energía y se forman algunas nuevas moléculas. Este alto nivel de actividad química dentro de las células, que mantiene al cuerpo humano a una temperatura de 37 °C mientras lleva a cabo las tareas corporales necesarias, se llama **metabolismo**, concepto que en términos sencillos se refiere a la combustión de alimentos como carbohidratos, grasas y proteínas. La tasa del metabolismo en el estado de descanso se conoce como *tasa metabólica basal*, que es la tasa de metabolismo requerida para que un cuerpo se mantenga desarrollando las funciones necesarias (como respiración y circulación sanguínea) a nivel cero de actividad externa. La tasa metabólica se puede interpretar también como la tasa de consumo de energía para un cuerpo. Para un hombre promedio (30 años de edad, 70 kg, 1.8 m^2 de área superficial corporal), la tasa metabólica basal es de 84 W; es decir, el cuerpo disipa energía al ambiente a una tasa de 84 W, lo cual significa que el cuerpo convierte energía química a partir del alimento (o de la grasa corporal si la persona no ha comido) en energía térmica, a una tasa de 84 W (Fig. 4-37). La tasa metabólica aumenta con el nivel de actividad y puede exceder 10 veces la basal cuando el cuerpo realiza ejercicio extenuante. Es decir, dos personas que realizan ejercicio intenso en una habitación pueden estar suministrando más energía a la habitación que un calentador de resistencia eléctrica de 1 kW (Fig. 4-38). La fracción de calor sensible varía de aproximadamente 40 por ciento en el caso de trabajo pesado hasta casi 70 por ciento para trabajo ligero. El resto de la energía se elimina del cuerpo por transpiración en forma de calor latente.

La tasa metabólica basal varía con el sexo, el tamaño del cuerpo, las condiciones generales de salud, etc., y decrece de modo considerable con la edad. A esto se debe que las personas tiendan a engordar entre finales de los 20 y los 30 años, aunque no incrementen su ingesta de alimentos. El cerebro y el hígado son los principales sitios de actividad metabólica. Estos dos órganos explican casi 50 por ciento de la tasa metabólica basal de un cuerpo humano adulto aunque sólo constituyen alrededor de 4 por ciento de la masa corporal. En los niños pequeños, es notable que casi la mitad de la actividad metabólica basal ocurra sólo en el cerebro.

Las reacciones biológicas en las células ocurren en esencia a temperatura, presión y volumen constantes. La temperatura de la célula tiende a subir cuando alguna energía química es convertida en calor, pero esta energía se transfiere con rapidez al sistema circulatorio, el cual la transporta a las partes exteriores del cuerpo y, con el tiempo, al ambiente por medio de la piel.

Las células musculares funcionan de una manera muy parecida a un motor, ya que convierten la energía química en mecánica (trabajo) con una eficiencia de conversión cercana a 20 por ciento. Cuando el cuerpo no hace trabajo neto sobre el ambiente (como subir muebles a un piso superior), el trabajo completo también se convierte en calor. En ese caso, toda la energía química del alimento liberada en el cuerpo durante el metabolismo es transferida finalmente al ambiente. Una televisión en operación permanente que consume electricidad a una tasa de 300 W debe eliminar calor hacia su ambiente a una tasa de 300 W sin importar qué suceda dentro del aparato. Es decir, encender una televisión de 300 W o tres bombillas de 100 W produce el mismo efecto de calentamiento en una habitación que un calentador de resistencia de 300 W (Fig. 4-39). Esto es una consecuencia del principio de conservación de la ener-

gía, el cual requiere que el aporte de energía a un sistema sea igual a la salida de energía cuando el contenido total de ésta en el sistema permanece constante durante el proceso.

Alimento y ejercicio

Los requerimientos de energía de un cuerpo se satisfacen con la ingesta de alimentos. Los nutrimentos alimenticios son considerados en tres grupos principales: carbohidratos, proteínas y grasas. Los *carbohidratos* se caracterizan por tener en sus moléculas átomos de hidrógeno y oxígeno en una relación de 2 a 1. Las moléculas de los carbohidratos van desde las muy sencillas (como el azúcar común) a las muy complejas o grandes (como el almidón). El pan y el azúcar son las principales fuentes de carbohidratos. Las *proteínas* son moléculas muy grandes que contienen carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, además de ser esenciales para la construcción y la reparación de los tejidos corporales. Están formadas por moléculas más pequeñas llamadas *aminoácidos*. Las proteínas completas como las que proporcionan la carne, la leche y el huevo tienen todos los aminoácidos requeridos para construir los tejidos corporales. Las provenientes de las plantas, como las que se encuentran en frutas, vegetales y granos, carecen de uno o más aminoácidos y se llaman proteínas incompletas. Las *grasas* son moléculas relativamente pequeñas conformadas por carbono, hidrógeno y oxígeno, y sus principales fuentes son los aceites vegetales y las grasas animales. La mayor parte de los alimentos contienen todos los grupos nutritivos en proporciones variables. La dieta estadounidense promedio consiste en 45 por ciento de carbohidratos, 40 por ciento de grasas y 15 por ciento de proteínas, aunque se recomienda que en una dieta saludable menos de 30 por ciento de las calorías vengan de la grasa.

El contenido energético de un alimento se determina quemando una pequeña muestra de éste en un dispositivo llamado *calorímetro de bomba*, que en esencia es un recipiente rígido bien aislado (Fig. 4-40). El recipiente contiene una pequeña cámara de combustión rodeada de agua. El alimento se quema en la cámara de combustión en presencia de oxígeno en exceso y la energía liberada se transfiere al agua circundante, de manera que el contenido de energía del alimento se calcula con base en el principio de conservación de la energía midiendo la elevación de temperatura del agua. Al quemarse el alimento, el carbono de éste se convierte en CO_2 y el hidrógeno en H_2O. Las mismas reacciones químicas ocurren en el cuerpo, por lo tanto se libera la misma cantidad de energía.

Utilizando muestras secas (libres de agua), el contenido promedio de energía de los tres grupos alimenticios básicos se determina a través de mediciones hechas con el calorímetro de bomba, lo cual da 18.0 MJ/kg para los carbohidratos, 22.2 MJ/kg para las proteínas y 39.8 MJ/kg para las grasas. Sin embargo, estos grupos alimenticios no se metabolizan por completo en el cuerpo humano: la fracción del contenido metabolizable de energía es de 95.5 por ciento para los carbohidratos, 77.5 para las proteínas y 97.7 para las grasas. Es decir, el cuerpo metaboliza casi por completo las grasas ingeridas, pero desecha sin quemar alrededor de una cuarta parte de la proteína ingerida. Esto corresponde a 4.1 calorías/gramo para proteínas y carbohidratos y 9.3 calorías/gramo para grasas (Fig. 4-41), lo cual se lee comúnmente en los libros de nutrición y en las etiquetas de los alimentos. El contenido de energía de los alimentos ingeridos normalmente es mucho menor que los valores anteriores debido a su gran contenido de agua (el agua añade volumen a los alimentos pero no puede ser metabolizada ni quemada, por lo tanto no tiene valor energético). Por ejemplo, la

Refrigerador de 300 W
Calentador de resistencia de 300 W
Ventilador de 300 W
Televisor de 300 W
Dos personas, cada una disipa 150 W
Tres focos incandescentes, cada uno de 100 W
Una computadora de 100 W con un monitor de 200 W
Energía solar 300 W

FIGURA 4-39

Dispositivos que suministran a una habitación la misma cantidad de energía que un calentador de resistencia eléctrica de 300 W.

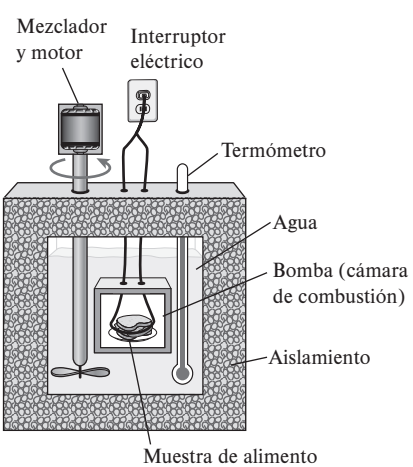


FIGURA 4-40

Esquema de un calorímetro de bomba utilizado para determinar el contenido de energía de muestras de alimentos.

3 galletas (32 g)

Grasa: (8 g)(9.3 Cal/g) = 74.4 Cal
Proteínas: (2 g)(4.1 Cal/g) = 8.2 Cal
Carbohidratos: (21 g)(4.1 Cal/g) = 86.1 Cal
Otros: (1 g)(0 Cal/g) = 0

Total (para 32 g): 169 Cal

FIGURA 4-41

Evaluación del contenido calórico de una porción de galletas con trozos de chocolate (los valores son para las galletas Chips Ahoy de Nabisco).

© Comstock/Getty Images RF

mayor parte de los vegetales, frutas y carnes son agua. El contenido promedio de energía metabolizable de los tres grupos alimenticios básicos es de 4.2 MJ/kg para los carbohidratos, 8.4 MJ/kg para las proteínas y 33.1 MJ/kg para las grasas. Observe que 1 kg de grasa natural contiene casi ocho veces la energía metabolizable de 1 kg de carbohidratos naturales. Por lo tanto, una persona que llena su estómago con comida grasosa está consumiendo mucha más energía que una persona que lo llena con carbohidratos como el pan o el arroz.

Generalmente los expertos en nutrición expresan el contenido de energía metabolizable de los alimentos en términos de *Calorías*, con mayúscula. Una Caloría equivale a una *kilocaloría* (1 000 calorías), lo cual es equivalente a 4.1868 kJ. Es decir,

$$1\ \text{Cal (Caloría)} = 1\,000\ \text{calorías} = 1\ \text{kcal (kilocaloría)} = 4.1868\ \text{kJ}$$

Esta notación para las calorías suele causar confusión ya que no siempre se sigue en tablas o artículos sobre nutrición. Cuando el tema es comida o salud, una caloría significa kilocaloría, esté o no escrita con mayúscula.

Las **necesidades calóricas diarias** de la gente varían en forma considerable con la edad, el género, el estado de salud, el nivel de actividad, el peso corporal y la composición del cuerpo, así como otros factores. Una persona pequeña requiere menos calorías que otra más grande del mismo sexo y edad. Un hombre promedio requiere entre 2 400 y 2 700 Calorías por día; mientras que la de una mujer promedio va de 1 800 a 2 200 Calorías. Las necesidades diarias están cerca de 1 600 para mujeres sedentarias y algunos adultos más viejos; 2 000 para los hombres sedentarios y la mayoría de los adultos viejos; 2 200 para la mayoría de los niños, chicas adolescentes y mujeres activas; 2 800 para adolescentes, hombres activos y algunas mujeres muy activas, y más de 3 000 para hombres muy activos. El valor *promedio* de ingesta calórica se considera, en general, de 2 000 Calorías diarias. Las necesidades calóricas de una persona se determinan multiplicando el peso corporal en libras (que es 2.205 veces el peso corporal en kg) por 11 para una persona sedentaria, por 13 para una persona moderadamente activa, por 15 para una persona que se ejercita o que hace trabajo físico moderado y por 18 para quien se ejercita activamente o hace trabajo físico intenso. Las calorías extra consumidas por un cuerpo se almacenan como grasa, la cual sirve como energía de reserva y se utiliza cuando la ingesta calórica del cuerpo es menor a la necesaria.

Al igual que otras grasas naturales, 1 kg de grasa del cuerpo humano contiene alrededor de 33.1 MJ de energía metabolizable. Por lo tanto, una persona hambrienta (ingesta cero de energía) que utilice 2 200 Calorías (9 211 kJ) al día puede satisfacer sus requerimientos energéticos diarios por ingesta quemando solamente 9 211/33 100 = 0.28 kg de grasa corporal. Así, no sorprende que una persona sobreviva más de 100 días sin comer. (Sin embargo, se requiere tomar agua para recuperar la que se pierde a través de los pulmones y la piel para evitar la deshidratación, que puede ocurrir en sólo unos pocos días.) Aunque el deseo de deshacerse del exceso de grasa en este mundo esbelto pueda ser en ocasiones avasallador, las dietas de hambre no son recomendables debido a que el cuerpo pronto empieza a consumir su propio tejido muscular además de la grasa. Una dieta saludable deberá incluir ejercicio regular y considerar una cantidad razonable de ingesta calórica.

Los contenidos promedio de energía metabolizable de varios alimentos y el consumo de energía para varias actividades se ofrecen en las tablas 4-1 y 4-2. Como podría esperarse, hay algo de incertidumbre en estos valores si se toma en cuenta que no existen dos hamburguesas iguales y que no hay dos personas

TABLA 4-1

Contenido de energía metabolizable aproximado de algunos alimentos comunes (1 Caloría = 4.1868 kJ = 3.968 Btu)

Alimento	Calorías	Alimento	Calorías	Alimento	Calorías
Manzana (una, mediana)	70	Refresco de cola (200 mL)	87	Ensalada de lechuga con aderezo francés	150
Papa horneada (sola)	250	Huevo (uno)	80	Leche (descremada, 200 mL)	76
Papa horneada con queso	550	Emparedado de pescado	450	Leche (entera, 200 mL)	136
Pan (blanco, una rebanada)	70	Papas fritas (normales)	250	Durazno (uno, mediano)	65
Mantequilla (una cucharadita)	35	Hamburguesa	275	Pay (una rebanada de $\frac{1}{8}$, 23 cm de diámetro)	300
Hamburguesa con queso	325	Hot dog	300	Pizza (grande, con queso, una rebanada de $\frac{1}{8}$)	350
Barra de chocolate (20 g)	105	Helado (100 mL, 10 por ciento de grasa)	110		

que caminen exactamente de la misma manera. Por lo tanto, es posible que para las mismas cuestiones se hallen valores un poco distintos en otros libros o revistas.

Las tasas de consumo de energía incluidas en la tabla 4-2 durante algunas actividades son para un adulto de 68 kg. La energía que consumen adultos más grandes o pequeños se determina mediante la proporcionalidad de la tasa metabólica y el tamaño corporal, por ejemplo, la tasa de consumo de energía por un ciclista de 68 kg se lista en la tabla 4-2 como 639 Calorías/h; entonces la tasa de consumo de energía de un ciclista de 50 kg es

$$(50 \text{ kg})\frac{639 \text{ Cal/h}}{68 \text{ kg}} = 470 \text{ Cal/h}$$

Para una persona de 100 kg, serían 940 Cal/h.

El análisis termodinámico del cuerpo humano es bastante complicado ya que tiene que ver con transferencia de masa (durante la respiración, transpiración, etc.), así como con transferencia de energía; por lo tanto se debe considerar como un sistema abierto. Sin embargo, la transferencia de energía con la masa es difícil de cuantificar, entonces el cuerpo humano se modela de manera simple como un sistema cerrado considerando la energía transportada con la masa únicamente como transferencia de energía. Por ejemplo, la alimentación se modela como la transferencia de energía hacia el cuerpo humano en la cantidad del contenido de energía metabolizable del alimento.

TABLA 4-2

Consumo de energía aproximado de un adulto de 68 kg durante algunas actividades (1 Caloría = 4.1868 kJ = 3.968 Btu)

Actividad	Calorías/h
Metabolismo basal	72
Baloncesto	550
Ciclismo (21 km/h)	639
Esquí a campo traviesa (13 km/h)	936
Conducir un automóvil	180
Comer	99
Baile rápido	600
Carrera rápida (13 km/h)	936
Trote (8 km/h)	540
Nado (rápido)	860
Nado (lento)	288
Tenis (avanzado)	480
Tenis (principiante)	288
Caminata (7.2 km/h)	432
Ver TV	72

Dietas

La mayor parte de las dietas se basan en el *conteo de calorías*; es decir, bajo el principio de conservación de la energía: una persona gana peso si el consumo de calorías es mayor al requerido y pierde peso si consume menos calorías de las que necesita su cuerpo. Sin embargo, las personas que comen lo que quieren cuando quieren sin ganar peso son prueba viviente de que por sí sola la técnica de conteo de calorías no funciona en la dieta. Es obvio que las dietas implican más que llevar la cuenta de las calorías. También es necesario tener en cuenta que las frases *ganancia de peso* y *pérdida de peso* son nombres poco apropiados; las frases correctas deben ser *ganancia de masa* y *pérdida de masa*. Un hombre que va al espacio pierde prácticamente todo su peso pero nada de

su masa. Cuando el tema es la alimentación y la salud, se entiende que *peso* significa *masa*, y el peso se expresa en unidades de masa.

Los investigadores en nutrición han propuesto varias teorías sobre las dietas, y una de éstas indica que ciertas personas tienen cuerpos muy "eficientes en relación con el alimento". Tales personas requieren menos calorías que otras para hacer la misma actividad, así como cierto automóvil requiere menos combustible para recorrer una determinada distancia. Es interesante reflexionar que siempre se desea un automóvil con alto rendimiento de combustible, aunque no se piensa lo mismo para nuestros cuerpos. Una cosa que frustra a quienes hacen dieta es que el cuerpo la interpreta como *inanición* y comienza a usar las reservas del cuerpo de modo más riguroso. Se ha observado que cambiar de una dieta diaria normal de 2 000 Calorías a otra de 800 Calorías, sin involucrar ejercicio, baja la tasa metabólica basal de 10 a 20 por ciento. Aunque la tasa metabólica se restablece al terminar la dieta, los largos periodos de dieta baja en calorías sin ejercicio adecuado producen, además de pérdida de grasa, otra muy considerable de tejido muscular. Con menos de este tejido para quemar calorías, la tasa metabólica del cuerpo decrece y se queda por debajo de lo normal aun después de que la persona empieza a comer normalmente. Como resultado, la persona recupera el peso que ha perdido en forma de grasa y más. La tasa metabólica basal permanece casi igual en la gente que se ejercita mientras hace dieta.

El ejercicio regular moderado es parte de cualquier programa saludable de dieta por una buena razón: construye o conserva el tejido muscular, el cual quema calorías mucho más rápido que el tejido graso. Es interesante saber que después del ejercicio aeróbico continúa la quema de calorías durante varias horas, de modo que se eleva de forma considerable la tasa metabólica general.

Otra teoría indica que las personas con *demasiadas células grasas* desarrolladas durante la niñez o adolescencia son mucho más propensas a ganar peso. Algunas personas creen que el contenido graso de sus cuerpos se controla mediante el ajuste de un mecanismo de "control de grasa", de manera semejante a como se controla con un termostato la temperatura de una casa.

Otras personas atribuyen sus problemas de peso a sus *genes*. Si se considera que 80 por ciento de los hijos de padres con sobrepeso también lo sufren, es posible que la herencia sí tenga un papel importante en la manera en que un cuerpo almacena grasa. Los investigadores de la Universidad de Washington y de la Universidad Rockefeller han identificado un gen, llamado el RIIbeta, que al parecer controla la tasa del metabolismo. El cuerpo trata de mantener la grasa corporal en un nivel particular, llamado **punto fijo**, el cual difiere de una persona a otra (Fig. 4-42). Esto ocurre *acelerando* el metabolismo y por lo tanto quemando calorías extra mucho más rápido cuando una persona tiende a ganar peso, así como *reduciendo* el metabolismo y quemando calorías a una tasa menor cuando una persona tiende a perder peso. Por lo tanto, una persona que acaba de adelgazar quema menos calorías que otra con el mismo tamaño quien siempre ha sido esbelta. Ni siquiera el ejercicio parece cambiar eso. Entonces, para no ganar peso, quien acaba de adelgazar no debería consumir más calorías de las que puede quemar. Observe que en las personas con altas tasas metabólicas, el cuerpo disipa las calorías extras como calor corporal en lugar de almacenarlas como grasa y, por lo tanto, no hay violación del principio de conservación de energía.

Se considera que algunas personas tienen una *falla genética* a la que se puede atribuir las tasas tan bajas de metabolismo. Varios estudios han llevado a la conclusión de que para dichas personas es casi imposible perder peso, es decir, la obesidad es un problema biológico. Sin embargo, aun ellos no gana-

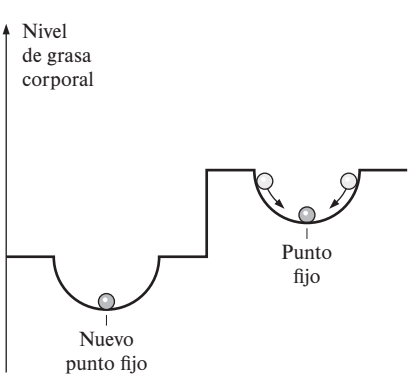


FIGURA 4-42

El cuerpo tiende a mantener el nivel de grasa corporal en un *punto fijo* acelerando el metabolismo cuando una persona come de más y disminuyéndolo cuando la persona está en ayuno.

rán peso a menos que coman más de lo que su cuerpo pueda quemar. Deben aprender a satisfacerse con poca comida para permanecer delgados y olvidarse alguna vez de llevar una vida con "alimentación" normal. Para la mayoría de la gente, la genética determina la escala de pesos normales. Una persona puede estar en el extremo alto o bajo de dicha escala, según sus hábitos alimenticios y de ejercicio. Esto también explica por qué algunos gemelos genéticamente idénticos no lo son tanto cuando se trata del peso corporal. También se cree que un *desequilibrio hormonal* puede causar ganancia o pérdida excesiva de peso.

Con base en su experiencia, el primer autor de este libro desarrolló una dieta llamada "*dieta sensata*". Consiste en dos reglas sencillas: coma *lo que quiera en el momento que lo desee y en la cantidad que quiera* con las condiciones de que 1) esto sea cuando tiene hambre y 2) deje de comer antes de hartarse. En otras palabras, *escuche a su cuerpo y no se aproveche de él*. No espere ver esta dieta poco científica anunciada en alguna parte, pues no hay nada que vender ni dinero que ganar. Además, no es tan fácil como suena ya que la comida toma el sitio central de la mayor parte de las actividades de ocio en la vida social, por lo que comer y beber se han vuelto sinónimos de diversión. Sin embargo, es reconfortante saber que el cuerpo humano puede perdonar imposiciones ocasionales.

El *sobrepeso* se relaciona con una larga lista de riesgos para la salud, desde presión arterial alta hasta algunas formas de cáncer, en particular para personas que tienen alguna condición médica relacionada con el peso, como la diabetes, hipertensión y enfermedades cardiacas. Por lo tanto, la gente suele preguntarse si su peso se encuentra en el nivel apropiado; bueno, la respuesta a esta pregunta no está labrada en piedra, pero si no ve los dedos de sus pies, o si puede pellizcar su "llantita" más de una pulgada, no necesita a un experto para saber que tiene sobrepeso. Por otra parte, algunas personas obsesionadas con su peso tratan de perderlo más aunque en realidad estén por debajo del correcto. Por lo tanto, es útil tener un criterio científico para determinar la aptitud física. El peso saludable para adultos se expresa por lo general en términos del **índice de masa corporal** (IMC), el cual se define en unidades SI como

$$\text{IMC} = \frac{W\,(\text{kg})}{H^2\,(\text{m}^2)} \quad \text{con} \quad \begin{array}{ll} \text{IMC} < 19 & \text{falta de peso} \\ 19 \le \text{IMC} \le 25 & \text{peso saludable} \\ \text{IMC} > 25 & \text{sobrepeso} \end{array} \qquad \textbf{(4-39)}$$

donde W es el peso (en realidad, la masa) de la persona en kg y H es su estatura en metros. Por lo tanto, un IMC de 25 es el límite superior para un peso saludable y una persona con un IMC de 27 está 8 por ciento pasada de peso. Se puede demostrar que la fórmula anterior es equivalente, en medidas inglesas, a IMC = 705 W/H^2, donde W está en libras y H en pulgadas. El nivel apropiado de peso para adultos de varias estaturas se da en la tabla 4-3 tanto en unidades SI como del sistema inglés.

TABLA 4-3

Intervalo de peso saludable para adultos de varias estaturas (fuente: National Institute of Health)

Unidades inglesas		*Unidades SI*	
Estatura, pulg	Peso saludable, lbm*	Estatura m	Peso, saludable, kg*
58	91-119	1.45	40-53
60	97-127	1.50	43-56
62	103-136	1.55	46-60
64	111-146	1.60	49-64
66	118-156	1.65	52-68
68	125-165	1.70	55-72
70	133-175	1.75	58-77
72	140-185	1.80	62-81
74	148-195	1.85	65-86
76	156-205	1.90	69-90

* Los límites superior e inferior del intervalo saludable corresponden a índices de masa corporal de 25 y 19, respectivamente.

EJEMPLO 4-14 **Quema de las calorías del almuerzo**

Un hombre de 90 kg comió en el almuerzo dos hamburguesas, una porción regular de papas fritas y 200 mL de bebida de cola (Fig. 4-43). Determine en cuánto tiempo quemará las calorías de este almuerzo *a*) viendo televisión y *b*) nadando con rapidez. ¿Cuáles serían las respuestas en el caso de un hombre de 45 kg?

FIGURA 4-43

Comida representativa analizada en el ejemplo 4-14.

© Copyright © Food Collection RF

SOLUCIÓN Un hombre ingirió su almuerzo en un restaurante de comida rápida. Se determinará el tiempo que tarda en quemar las calorías del almuerzo viendo la televisión y nadando rápido.

Suposiciones Los valores de las tablas 4-1 y 4-2 son aplicables para la comida y el ejercicio.

Análisis *a*) Se toma el cuerpo humano como el *sistema* y se le trata como un *sistema cerrado* cuyo contenido de energía permanece sin cambio durante el proceso. Entonces, el principio de conservación de energía requiere que la entrada de energía al cuerpo debe ser igual a la salida de energía. La entrada de energía neta en este caso es el contenido de energía metabolizable de la comida ingerida. A partir de la tabla 4-1 se determina como

$$\begin{aligned} E_{\text{entrada}} &= 2 \times E_{\text{hamburguesa}} + E_{\text{papas}} + E_{\text{cola}} \\ &= 2 \times 275 + 250 + 87 \\ &= 887 \text{ Cal} \end{aligned}$$

La tasa de salida de energía para un hombre de 68 kg que ve la televisión se presenta en la tabla 4-2 como 72 Calorías/h. Para un hombre de 90 kg ésta se convierte en

$$E_{\text{salida}} = (90 \text{ kg}) \frac{72 \text{ Cal/h}}{68 \text{ kg}} = 95.3 \text{ Cal/h}$$

Por lo tanto, tomará

$$\Delta t = \frac{887 \text{ Cal}}{95.3 \text{ Cal/h}} = \mathbf{9.3 \text{ h}}$$

quemar las calorías del almuerzo viendo televisión.

b) Se puede mostrar de una manera similar que sólo toma **47 min** quemar las calorías del almuerzo si se nada rápido.

Comentario El hombre de 45 kg es la mitad de grande que el hombre de 90 kg. Por lo tanto, gastar la misma cantidad de energía requiere el doble de tiempo en cada caso: **18.6 h** viendo televisión y **94 min** nadando rápido.

FIGURA 4-44
Esquema para el ejemplo 4-15.

EJEMPLO 4-15 **Pérdida de peso con cambiar a papas sin grasa**

La grasa artificial olestra pasa por el cuerpo sin ser digerida y, por lo tanto, añade cero calorías a la dieta. Aunque los alimentos cocinados con olestra saben bien, podrían causar dolor abdominal y se desconocen los efectos a largo plazo. Una porción de 1 onza (28.3 gramos) de papas fritas normales tiene 10 gramos de grasa y 150 Calorías, mientras que 1 onza de las denominadas papas sin grasa freídas en olestra tiene sólo 75 Calorías. Considere una persona que come 1 onza de papas fritas normales todos los días a la hora del almuerzo sin ganar o perder peso. Determine cuánto peso pierde esta persona en un año si cambia a las papas sin grasa (Fig. 4-44).

SOLUCIÓN Una persona cambia de papas fritas normales a otras sin grasa. Se determinará el peso que pierde la persona en un año.

Suposiciones El ejercicio y otros hábitos alimenticios permanecen iguales.

Análisis La persona que cambia a papas sin grasa consume 75 Calorías menos al día. Entonces la reducción anual de calorías consumidas es

$$E_{\text{reducida}} = (75 \text{ Cal/día})\,(365 \text{ días/año}) = 27\,375 \text{ Cal/año}$$

El contenido de energía metabolizable de 1 kg de grasa corporal es de 33 100 kJ. Por lo tanto, si se supone que el déficit en la ingestión de calorías se compensa quemando grasa corporal, la persona que cambia a papas sin grasa perderá

$$m_{\text{grasa}} = \frac{E_{\text{reducida}}}{\text{Contenido de energía de la grasa}} = \frac{27\ 375\ \text{Cal}}{33\ 100\ \text{kJ/kg}} \left(\frac{4.1868\ \text{kJ}}{1\ \text{Cal}}\right) = \mathbf{3.46\ kg}$$

(cerca de 7.6 libras) de grasa corporal por año.

RESUMEN

El trabajo es la energía transferida cuando una fuerza actúa sobre un sistema a lo largo de una distancia. La forma más común de trabajo mecánico es el *trabajo de frontera*, que es el trabajo relacionado con la expansión y compresión de sustancias. En un diagrama *P-V*, el área bajo la curva del proceso representa el trabajo de frontera para un proceso de cuasiequilibrio. Varias formas de trabajo de frontera se expresan como:

1) General $\qquad W_b = \int_1^2 P\, dV$

2) Proceso isobárico

$$W_b = (P_0 V_2 - V_1) \qquad (P_1 = P_2 = P_0 = \text{constante})$$

3) Proceso politrópico

$$W_b = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1 - n} \quad (n \neq 1) \qquad (PV^n = \text{constante})$$

4) Proceso isotérmico de un gas ideal

$$W_b = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = mRT_0 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$(PV = mRT_0 = \text{constante})$$

La primera ley de la termodinámica es en esencia una expresión del principio de conservación de la energía, llamado también balance de energía. Es posible expresar los balances de energía generales para *cualquier sistema* que experimenta *algún proceso* como

$$\underbrace{E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}}}_{\substack{\text{Transferencia neta de energía} \\ \text{por calor, trabajo y masa}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Cambio en las energías interna,} \\ \text{cinética, potencial, etcétera}}}$$

También se puede expresar en *forma de tasa* como

$$\underbrace{\dot{E}_{\text{entrada}} - \dot{E}_{\text{salida}}}_{\substack{\text{Tasa de transferencia de energía neta} \\ \text{por calor, trabajo y masa}}} = \underbrace{dE_{\text{sistema}}/dt}_{\substack{\text{Tasa de cambio de las energías interna,} \\ \text{cinética y potencial, etcétera}}}$$

Si se toman como cantidades positivas la transferencia de calor *hacia* el sistema y el trabajo realizado *por* el sistema, el balance de energía para un sistema cerrado también se puede expresar como

$$Q - W = \Delta U + \Delta \text{EC} + \Delta \text{EP}$$

donde

$$W = W_{\text{otro}} + W_b$$

$$\Delta U = m(u_2 - u_1)$$

$$\Delta \text{EC} = \tfrac{1}{2} m(V_2^2 - V_1^2)$$

$$\Delta \text{EP} = mg(z_2 - z_1)$$

Para un *proceso a presión constante*, $W_b + \Delta U = \Delta H$. Así,

$$Q - W_{\text{otro}} = \Delta H + \Delta \text{EC} + \Delta \text{EP}$$

Observe que la relación anterior se limita a procesos a presión constante de sistemas cerrados y *no* es válida para procesos donde cambia la presión.

La cantidad de energía necesaria para elevar en un grado la temperatura de una masa unitaria de una sustancia se llama *calor específico a volumen constante* c_v para un proceso a volumen constante y *calor específico a presión constante* c_p para otro a presión constante. Se define como

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v \qquad \text{y} \qquad c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p$$

Para gases ideales u, h, c_v y c_p son funciones sólo de la temperatura. El Δu y Δh de gases ideales se expresa como

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_1^2 c_v(T)\, dT \cong c_{v,\text{prom}}(T_2 - T_1)$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \int_1^2 c_p(T)\, dT \cong c_{p,\text{prom}}(T_2 - T_1)$$

Para gases ideales, c_v y c_p se relacionan mediante

$$c_p = c_v + R$$

donde R es la constante del gas. La *relación de calores específicos* k se define como

$$k = \frac{c_p}{c_v}$$

Para *sustancias incompresibles* (líquidos y sólidos), ambos calores específicos, a presión y volumen constantes, son idénticos y se denotan mediante c:

$$c_p = c_v = c$$

Las expresiones para Δu y Δh de sustancias incompresibles son

$$\Delta u = \int_1^2 c\,(T)\,dT \cong c_{\text{prom}}\,(T_2 - T_1)$$

$$\Delta h = \Delta u + v\Delta P$$

REFERENCIAS Y LECTURAS RECOMENDADAS

1. ASHRAE, *Handbook of Fundamentals*, versión SI, Atlanta, GA, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1993.

2. ASHRAE, *Handbook of Refrigeration*, versión SI, Atlanta, GA, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1994.

PROBLEMAS*

Trabajo de frontera móvil

4-1C ¿Siempre es cero el trabajo frontera asociado con sistemas de volumen constante?

4-2C En un diagrama P-v, ¿qué representa el área bajo la curva de proceso?

4-3C Un gas ideal se expande de un estado especificado hasta un volumen final fijo dos veces, primero a presión constante y después a temperatura constante. ¿Para cuál caso el trabajo efectuado es mayor?

4-4 Calcule el trabajo total, en kJ, realizado en los procesos 1-3 en la figura P4-4, cuando el sistema se compone de 2 kg de nitrógeno.

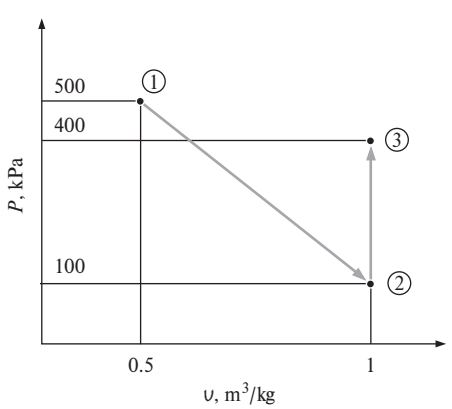


FIGURA P4-4

4-5E Calcule el trabajo total en Btu, producido por el proceso de la figura P4-5E.

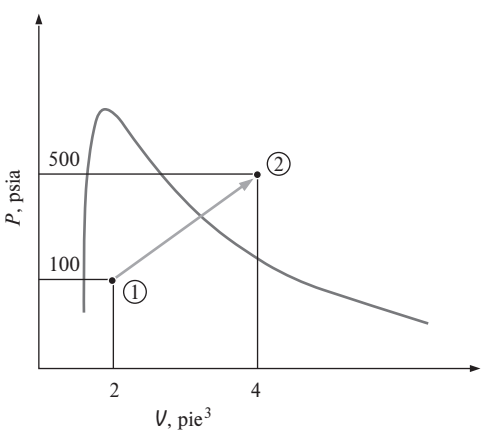


FIGURA P4-5E

4-6 Nitrógeno en un estado inicial de 300 K, 150 kPa y 0.2 m^3 se comprime lentamente en un proceso isotérmico hasta una presión final de 800 kPa. Determine el trabajo realizado durante este proceso.

4-7 El volumen de 1 kg de helio, en un dispositivo de cilindro-émbolo, es 5 m^3, en un principio. A continuación, el helio se comprime hasta 2 m^3, manteniendo constante su presión en 130 kPa. Determine las temperaturas inicial y final del helio, así como el trabajo requerido para comprimirlo, en kJ.

4-8 Un dispositivo de cilindro-émbolo, con un grupo de topes, contiene inicialmente 0.6 kg de vapor de agua a 1.0 MPa y 400 °C. El lugar de los topes corresponde al 40 por ciento del volumen inicial. Entonces, se enfría el vapor de agua. Determine el trabajo de compresión, si el estado final es *a*) 1.0 MPa y 250 °C, y *b*) 500 kPa. *c*) También determine la temperatura del estado final en el inciso *b*).

* Los problemas marcados con "C" son preguntas de concepto, y se exhorta a los alumnos a contestarlas todas. Los problemas marcados con una "E" están en unidades inglesas, y quienes utilizan unidades SI pueden ignorarlos. Los problemas con un ícono son extensos y se recomienda emplear un software apropiado para resolverlos.

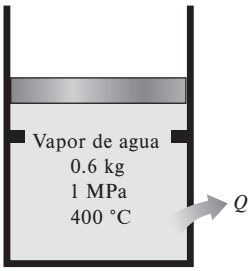


FIGURA P4-8

4-9 Una masa de 5 kg de vapor de agua saturado a 150 kPa se calienta a presión constante hasta que la temperatura es de 200 °C. Calcule el trabajo realizado por el vapor durante este proceso. *Respuesta:* 214 kJ

4-10E Un dispositivo de cilindro-émbolo sin fricción contiene 16 lbm de vapor de agua sobrecalentado a 40 psia y 600 °F. Luego el vapor se enfría a presión constante hasta que un 70 por ciento de su masa se condensa. Determine el trabajo realizado durante este proceso.

4-11 Se expande isotérmicamente 1 m^3 de agua líquida saturada a 200 °C en un sistema cerrado hasta que su calidad llega a 80 por ciento. Determine el trabajo total producido por esta expansión en kJ.

4-12 Se comprime argón en un proceso politrópico con n = 1.2 de 120 kPa y 30 °C hasta 1 200 kPa en un dispositivo de pistón-cilindro. Determine la temperatura final del argón.

4-13 Se comprime un gas desde un volumen inicial de 0.42 m^3 hasta un volumen final de 0.12 m^3. Durante el proceso de cuasiequilibrio, la presión cambia con el volumen de acuerdo con la relación $P = aV + b$, donde $a = -1\,200$ kPa/m^3 y b = 600 kPa. Calcule el trabajo realizado durante este proceso *a*) trazando el proceso en un diagrama *P-V* y determinando el área bajo la curva del proceso y *b*) realizando las integraciones necesarias.

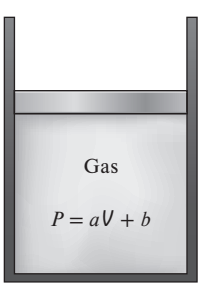


FIGURA P4-13

4-14 Una masa de 1.5 kg de aire a 120 kPa y 24 °C está dentro de un dispositivo de cilindro-émbolo hermético y sin fricción. A continuación se comprime el aire hasta una presión final de 600 kPa. Durante el proceso se transfiere calor del aire de tal modo que permanece constante la temperatura en el interior del cilindro. Calcule el trabajo consumido durante este proceso. *Respuesta:* 206 kJ

4-15 Durante unos procesos reales de expansión y compresión en dispositivos de cilindro-émbolo, se ha observado que los gases satisfacen la relación $PV^n = C$, donde n y C son constantes. Calcule el trabajo efectuado cuando un gas se expande de 350 kPa y 0.03 m^3, hasta un volumen final de 0.2 m^3, para el caso en que $n = 1.5$.

4-16 Regrese al problema 4-15. Use un programa apropiado para graficar el proceso descrito en el problema, en un diagrama *P-V*, e investigue el efecto del exponente politrópico, de 1.1 a 1.6. Trace la gráfica del trabajo de la frontera en función del exponente politrópico, y describa los resultados.

4-17 Un dispositivo de cilindro-émbolo sin fricción contiene 5 kg de nitrógeno a 100 kPa y 250 K. El nitrógeno se comprime entonces lentamente, siguiendo la relación $PV^{1.4}$ = constante, hasta que llega a una temperatura final de 450 K. Calcule el trabajo consumido durante este proceso. *Respuesta:* 742 kJ

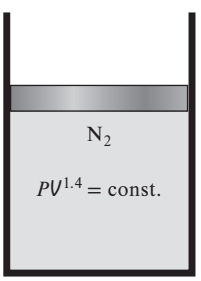


FIGURA P4-17

4-18E Durante un proceso de expansión, la presión de un gas cambia de 15 a 100 psia, siguiendo la relación $P = aV + b$, donde a = 5 psia/$pies^3$ y b es una constante. Si el volumen inicial del gas es 7 $pies^3$, calcule el trabajo efectuado durante el proceso. *Respuesta:* 181 Btu

4-19 Un dispositivo de pistón-cilindro inicialmente contiene 0.4 kg de gas nitrógeno a 160 kPa y 140 °C. Luego el nitrógeno se expande isotérmicamente a una presión de 100 kPa. Determine el trabajo de frontera durante este proceso.
Respuesta: 23.0 kJ

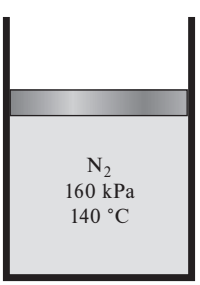


FIGURA P4-19

4-20 Un dispositivo de pistón-cilindro contiene 0.15 kg de aire en un inicio a 2 MPa y 350 °C. El aire primero se expande isotérmicamente a 500 kPa, y luego se comprime de modo politrópico con un exponente politrópico de 1.2 a la presión inicial, y por último se comprime a la presión constante hasta el estado inicial. Determine el trabajo de frontera en cada proceso y el trabajo neto del ciclo.

4-21 Determine el trabajo de frontera realizado por un gas durante un proceso de expansión si los valores de presión y volumen en varios estados son 300 kPa, 1 L; 290 kPa, 1.1 L; 270 kPa, 1.2 L; 250 kPa, 1.4 L; 220 kPa, 1.7 L; y 200 kPa, 2 L.

4-22 1 kg de agua que al principio está a 90 °C, con 10 por ciento de calidad, ocupa un dispositivo de cilindro-émbolo accionado por resorte, como el de la figura P4-22. Entonces se calienta ese dispositivo hasta que la presión sube hasta 800 kPa, y la temperatura es 250 °C. Calcule el trabajo total producido durante este proceso, en kJ. *Respuesta:* 24.5 kJ

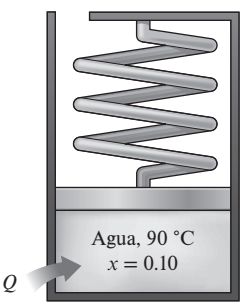


FIGURA P4-22

4-23 Un gas ideal experimenta dos procesos en un dispositivo de cilindro-émbolo como sigue:

1-2 Compresión politrópica de T_1 y P_1 con exponente politrópico n y una relación de compresión de $r = V_1/V_2$.

2-3 Expansión a presión constante a $P_3 = P_2$ hasta que $V_3 = V_1$.

a) Haga un esquema de los procesos en un solo diagrama *P-V*.

b) Obtenga una expresión para la relación del trabajo de compresión al de expansión como función de n y r.

c) Encuentre el valor de esta relación para valores de $n = 1.4$ y $r = 6$.

Respuestas: b) $\frac{1}{n-1}\left(\frac{1-r^{1-n}}{r-1}\right)$, *c)* 0.256

4-24 Un dispositivo cilindro-émbolo contiene 50 kg de agua a 250 kPa y 25 °C. El área transversal del émbolo es de 0.1 m^2. Se transfiere calor al agua, lo que ocasiona que parte de ella se evapore y expanda. Cuando el volumen llega a los 0.2 m^3, el émbolo alcanza a un resorte lineal cuya constante del resorte es de 100 kN/m. Se transfiere más calor al agua hasta que el émbolo se eleva 20 cm más. Determine *a*) la presión y temperatura finales y *b*) el trabajo realizado durante este proceso. También muestre el proceso en un diagrama *P-V*.

Respuestas: a) 450 kPa, 147.9 °C, *b)* 44.5 kJ

4-25 Reconsidere el problema 4-24 y con ayuda del software apropiado, investigue el efecto de la constante del resorte sobre la presión final en el cilindro y el trabajo de frontera realizado. Permita una variación de la constante del resorte de 50 kN/m a 500 kN/m. Diagrame la presión final y el trabajo de frontera contra la constante del resorte, y analice los resultados.

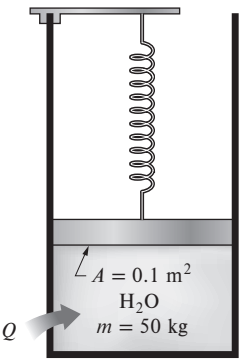


FIGURA P4-24

4-26 Dióxido de carbono contenido en un dispositivo de pistón-cilindro se comprime de 0.3 a 0.1 m^3. Durante este proceso, la presión y el volumen están relcionados por $P = aV^2$, donde $a = 8$ kPa · m^6. Calcule el trabajo realizado en el dióxido de carbono durante este proceso. *Respuesta:* 53.3 kJ

Análisis de energía de sistemas cerrados

4-27E Un sistema cerrado como el de la figura P4-27E se pone a funcionar de manera adiabática. En primer lugar, este sistema realiza 15 000 lbf · pie de trabajo. Luego, se aplica trabajo al dispositivo agitador para incrementar la energía interna del fluido en 10.28 Btu. Calcule el incremento neto de la energía interna de este sistema.

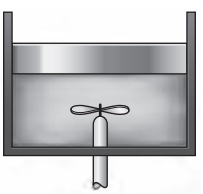


FIGURA P4-27E

4-28 Un recipiente rígido con un agitador contiene 2.5 kg de aceite para motor. Determine la tasa de aumento en la energía específica, cuando se transfiere calor al aceite, a la tasa de 1 W, y se aplica 1.5 W de potencia al agitador.

4-29 Complete cada reglón de la siguiente tabla con base en el principio de conservación de la energía de en un sistema cerrado.

$Q_{entrada}$ kJ	W_{salida} kJ	E_1 kJ	E_2 kJ	m kg	$e_2 - e_1$ kJ/kg
280	—	1 020	860	3	—
−350	130	550	—	5	—
—	260	300	—	2	150
300	—	750	500	1	—
—	−200	—	300	2	−100

FIGURA P4-29

4-30 Un recipiente rígido bien aislado equipado con un agitador contiene una sustancia, como se muestra en la Fig. P4-30. Determine el cambio de la energía interna de esta sustancia cuando se aplican 15 kJ de trabajo al agitador.

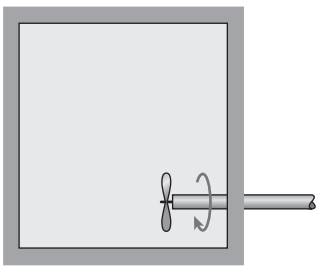


FIGURA P4-30

4-31 Un tanque rígido de 0.5 m^3 contiene refrigerante-134a que en un inicio está a 160 kPa y 40 por ciento de calidad. Se transfiere calor al refrigerante hasta que su presión alcanza 700 kPa. Determine *a*) la masa del refrigerante en el tanque y *b*) la cantidad de calor transferido. También muestre el proceso en un diagrama *P-v* con respecto a las líneas de saturación.

4-32E En un inicio un tanque rígido de 20 $pies^3$ contiene vapor saturado de refrigerante-134a a 160 psia. A consecuencia de la transferencia de calor del refrigerante, la presión desciende a 50 psia. Muestre el proceso en un diagrama *P-V* con respecto a las líneas de saturación y determine *a*) la temperatura final, *b*) la cantidad de refrigerante que se ha condensado y *c*) la transferencia de calor.

4-33 Un recipiente rígido de 10 L contiene inicialmente una mezcla de agua líquida y vapor a 100 °C con calidad de 12.3 por ciento. Luego se calienta la mezcla hasta que su temperatura es de 180 °C. Calcule la transferencia de calor necesaria para este proceso. *Respuesta:* 92.5 kJ

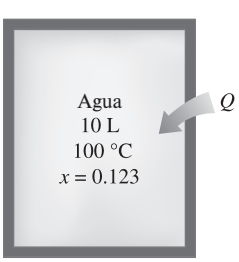


FIGURA P4-33

4-34E Un recipiente rígido de 1 pie^3 contiene R-134a originalmente a –20 °F y 27.7 por ciento de calidad. Luego, se calienta el refrigerante hasta que su temperatura es de 100 °F. Calcule la transferencia de calor requerida para hacer esto.
Respuesta: 84.7 Btu

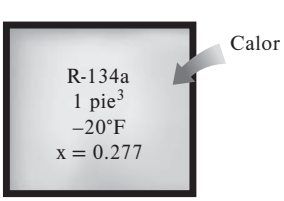


FIGURA P4-34E

4-35 Un dispositivo de pistón-cilindro contiene 5 kg de refrigerante 134a a 800 kPa y 70 °C. El refrigerante se enfría a presión constante hasta su estado líquido a 15 °C. Determine la cantidad de calor y muestre el proceso en un diagrama T-*V* con respecto a las líneas de saturación. *Respuesta:* 1 173 kJ

4-36E Un dispositivo de pistón-cilindro contiene 0.5 lbm de agua inicialmente a 120 psia y 2 $pies^3$. Ahora se transfieren 200 Btu de calor al agua mientras que su presión se mantiene constante. Determine la temperatura final del agua. Además, muestre el proceso en un diagrama *T-V* con respecto a las líneas de saturación.

4-37 2 kg de agua líquida saturada a 150 °C se calientan a presión constante en un dispositivo de pistón-cilindro hasta que es vapor saturado. Determine la transferencia de calor requerida en este proceso.

4-38 Un dispositivo aislado de cilindro-émbolo contiene 5 L de agua líquida saturada a una presión constante de 175 kPa. Una rueda de paletas agita el agua, mientras que pasa una corriente de 8 A durante 45 min, por una resistencia colocada en el agua. Si se evapora la mitad del líquido durante este proceso a presión constante, y el trabajo de la rueda de paletas es 400 kJ, determine el voltaje de suministro. También, muestre el proceso en un diagrama P-v con respecto a líneas de saturación. *Respuesta:* 224 V

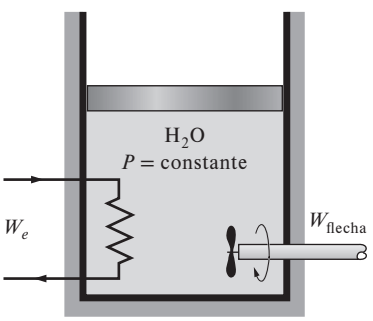


FIGURA P4-38

4-39 Un radiador eléctrico con 40 L de aceite se coloca en un recinto de 50 m^3. Tanto el recinto como el aceite del radiador están a 10 °C en un principio. El radiador tiene una potencia nominal de 2.4 kW y se enciende. Al mismo tiempo, se pierde calor del recinto a una tasa promedio de 0.35 kJ/s. Después de algún tiempo, se mide la temperatura promedio y resulta 20 °C, para el aire en el recinto, y 50 °C para el aceite en el radiador. Suponiendo que la densidad y el calor específico del aceite sean 950 kg/m^3 y 2.2 kJ/kg · °C, respec-

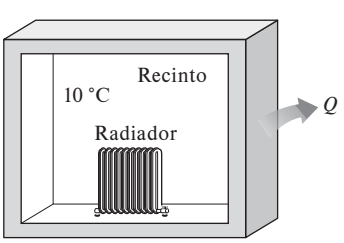


FIGURA P4-39

tivamente, determine cuánto tiempo se mantuvo encendido el calentador. Suponga que el recinto está bien hermetizado, para que no haya fugas de aire.

4-40 En un dispositivo de cilindro-émbolo con carga de resorte está contenido vapor de agua a 75 kPa y 8 por ciento de calidad, como se ve en la figura P4-40, con un volumen inicial de 2 m^3. Entonces se calienta el vapor de agua hasta que su volumen es 5 m^3 y su presión es 225 kPa. Calcule el calor transferido al vapor de agua, y el trabajo producido por el mismo, durante este proceso.

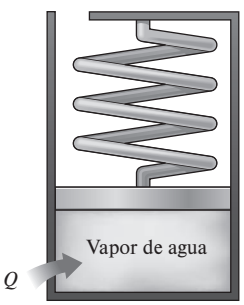


FIGURA P4-40

4-41 Un dispositivo de pistón-cilindro inicialmente contiene 0.6 m^3 de vapor de agua saturado a 250 kPa. En este estado, el pistón está en contacto con los topes, y la masa de pistón es tal que se requiere una presión de 300 kPa para moverlo. Se transfiere calor lentamente al vapor hasta que su volumen se duplica. Muestre el proceso en un diagrama *P-υ* con respecto a las líneas de saturación y determine *a*) la temperatura final, *b*) el trabajo realizado durante este proceso, y *c*) la transferencia total de calor.

Respuestas: a) 662 °C, *b*) 180 kJ, *c*) 910 kJ

4-42 Un tanque aislado se divide en dos partes mediante una separación. Una parte del tanque contiene 2.5 kg de agua líquida comprimida a 60 °C y 600 kPa, mientras que la otra parte es vaciada. Se retira la división y el agua se expande para abarcar todo el tanque. Determine la temperatura final del agua y el volumen del tanque para una presión final de 10 kPa.

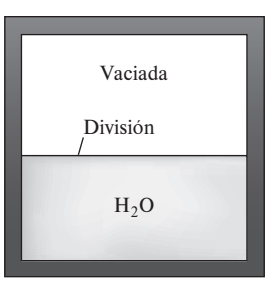


FIGURA P4-42

4-43 Reconsidere el problema 4-42 y con ayuda del software apropiado, investigue el efecto de la presión inicial de agua en la temperatura final en el tanque. Deje que la presión inicial varíe de 100 a 600 kPa. Diagrame la temperatura final en función de la presión inicial, y analice los resultados.

4-44 Dos tanques (tanque A y tanque B) están separados por una división. Inicialmente el tanque A contiene 2 kg de vapor a 1 MPa y 300 °C, mientras que el tanque B contiene 3 kg de una mezcla saturada de vapor-líquido a 150 °C con una fracción de masa de vapor de 50 por ciento. Se quita la división y se permite que los dos lados se mezclen hasta que se establece el equilibrio mecánico y térmico. Si la presión en el estado final es de 300 kPa, determine *a*) la temperatura y calidad del vapor (si está mezclado) en el estado final y *b*) la cantidad de calor perdido de los tanques.

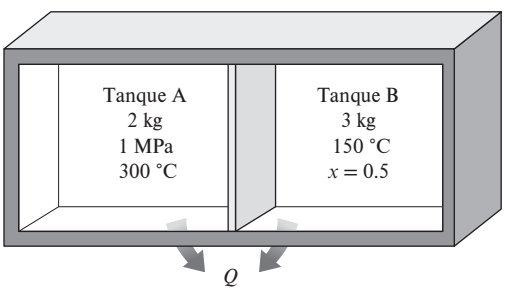


FIGURA P4-44

Calores específicos, Δu y Δh de gases ideales

4-45C ¿Es igual la energía requerida para calentar aire de 295 a 305 K, que la necesaria para calentarlo de 345 a 355 K? Suponga que en ambos casos la presión permanece constante.

4-46C Una masa fija de un gas ideal se calienta de 50 a 80 °C a la presión constante de *a*) 1 atm y *b*) 3 atm. ¿En qué caso cree usted que será mayor la energía requerida? ¿Por qué?

4-47C Una masa fija de un gas ideal se calienta de 50 a 80 °C al volumen constante e igual a *a*) 1 m^3 y *b*) 3 m^3. ¿En cuál caso cree usted que será mayor la energía requerida? ¿Por qué?

4-48C Se calienta una masa fija de un gas ideal de 50 a 80 °C a *a*) un volumen constante y *b*) a una presión constante. ¿En qué caso considera que la energía requerida será mayor? ¿Por qué?

4-49C ¿Está restringida la relación $\Delta u = mc_{v,prom}\,\Delta T$ a sólo procesos a volumen constante, o se puede usar para cualquier clase de proceso de un gas ideal

4-50C ¿Está restringida la relación $\Delta u = mc_{v,prom}\,\Delta T$ a sólo procesos a presión constante, o se puede usar para cualquier clase de proceso de un gas ideal?

4-51E ¿Cuál es el cambio de la energía interna, en Btu/lbm, de aire a medida que su temperatura cambia de 100 a 200 °F? Hay alguna diferencia si la temperatura cambiara de 0 a 100 °F?

4-52 Se comprime neón de 100 kPa y 20 °C a 500 kPa en un compresor isotérmico. Determine el cambio del volumen específico y la entalpía específica del neón debido a esta compresión.

4-53 ¿Cuál es el cambio de la entalpía en kJ/kg, de oxígeno a medida que su temperatura cambia de 150 a 250 °C? ¿Hay alguna diferencia si la temperatura cambiara de 0 a 100 °C?

¿Tiene la presión al principio y al final de este proceso algún efecto en el cambio de entalpía?

4-54 El dispositivo de pistón-cilindro accionado por resorte mostrado en la figura P4-54 contiene una masa de 10 g de nitrógeno. La constante del resorte es de 1 kN/m, y el diámetro del pistón es de 10 cm. Cuando el resorte no ejerce fuerza contra el pistón, el nitrógeno está a 120 kPa y 27 °C. Luego se calienta el dispositivo hasta que su volumen es 10 por ciento más grande que el volumen original. Determine el cambio de la energía interna específica y la entalpía del nitrógeno.
Respuestas: 46.8 kJ/kg, 65.5 kJ/kg

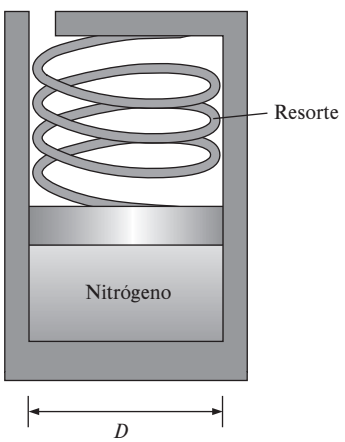


FIGURA P4-54

4-55 Determine el cambio de energía interna Δu de hidrógeno, en kJ/kg, a medida que se calienta de 200 a 800 K, utilizando *a*) la ecuación de calor específico empírica en función de la temperatura (tabla A-2*c*), *b*) el valor c_v a la temperatura promedio (tabla A-2*b*), y *c*) el valor c_v a temperatura ambiente (tabla A-2*a*).

4-56E Determine el cambio de entalpía Δh de oxígeno, en Btu/lbm a medida que se calienta de 800 a 1 500 R, utilizando *a*) la ecuación de calor específico empírica en función de la temperatura (tabla A-2E*c*), *b*) el valor c_p a la temperatura promedio (tabla A-2E*b*), y *c*) el valor c_p a temperatura ambiente (tabla A-2E*a*). *Respuestas: a*) 170 Btu/lbm, *b*) 169 Btu/lbm, *c*) 153 Btu/lbm

Análisis de energía de sistemas cerrados: gases ideales

4-57C ¿Es posible comprimir isotérmicamente un gas ideal, en un dispositivo adiabático de cilindro-émbolo? Explique por qué.

4-58 Se enfría nitrógeno en un recipiente rígido y libera 100 kJ/kg de calor. Determine el cambio de la energía interna del nitrógeno, en kJ/kg.

4-59E Nitrógeno a 100 psia y 300 °F en un recipiente rígido se enfría hasta que su presión es 50 psia. Determine el trabajo realizado y el calor transferido durante este proceso, en Btu/lbm. *Respuestas:* 0 Btu/lbm, 67.3 Btu/lbm

4-60E Un dispositivo de pistón-cilindro que contiene dióxido de carbono se somete a un proceso isobárico de 15 psia y 80 a 200 °F. Determine el trabajo y la transferencia de calor asociados con este proceso, en Btu/lbm.
Respuestas: 5.42 Btu/lbm, 24.4 Btu/lbm

4-61 Un tanque rígido de 3 m^3 contiene hidrógeno a 250 kPa y 550 K. El gas se enfría hasta que su temperatura es de 350 K. Determine *a*) la presión final en el tanque, y *b*) la cantidad de transferencia de calor.

4-62 Se calienta 1 kg de oxígeno de 20 a 120 °C. Determine la cantidad de transferencia de calor requerida cuando esto se hace durante *a*) un proceso a volumen constante y *b*) un proceso isobárico.

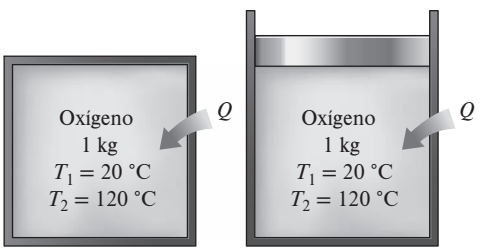


FIGURA P4-62

4-63E Un tanque de 10 $pies^3$ contiene oxígeno inicialmente a 14.7 psia y 80 °F. Una rueda de paletas dentro del tanque gira hasta que la presión en el interior se eleva a 20 psia. Durante el proceso se liberan 20 Btu de calor al ambiente. Determine el trabajo realizado por la rueda de paletas. Ignore la energía almacenada en ésta.

4-64 El radiador de un sistema de calefacción de vapor calienta una habitación de 4 m × 5 m × 7 m. El radiador de vapor emite calor a razón de 10 000 kJ/h, y un ventilador de 100 W distribuye el aire caliente en la habitación. La tasa de pérdida de calor estimada de la habitación es de cerca de 5 000 kJ/h. Si la temperatura inicial del aire en la habitación es 10 °C, determine en cuánto tiempo se elevará la temperatura del aire a 20 °C. Suponga calores específicos a temperatura ambiente.

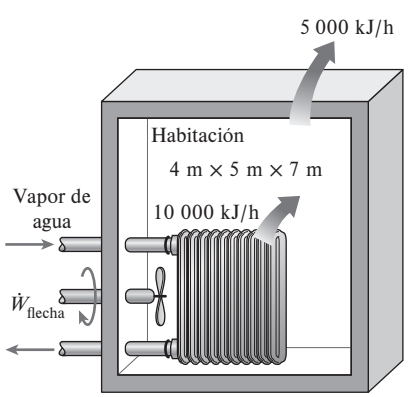


FIGURA P4-64

4-65 Un tanque rígido aislado se divide en dos partes iguales mediante una división. Inicialmente, una parte contiene 4 kg de un gas ideal a 800 kPa y 50 °C, y la otra parte está vacía. Se

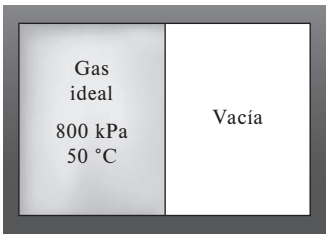


FIGURA P4-65

quita la división y el gas se expande en todo el tanque. Determine la temperatura y presión finales en el tanque.

4-66 Un gas ideal contenido en un dispositivo de pistón-cilindro se somete a un proceso de compresión isotérmica la cual se inicia con una presión y volumen iniciales de 100 kPa y 0.6 m^3, respectivamente. Durante el proceso se transfieren 60 kJ de calor del gas ideal al medio ambiente. Determine el volumen y presión al final del proceso. *Respuestas:* 0.221 m^3, 272 kPa

4-67 Se va a calentar un recinto de 4 m × 5 m × 6 m con un calentador eléctrico colocado sobre un rodapié. Se desea que ese calentador pueda elevar la temperatura del recinto de 5 a 25 °C en 17 min. Suponiendo que no hay pérdidas de calor del recinto, y una presión atmosférica de 100 kPa, calcule la potencia requerida del calentador. Suponga que los calores específicos son constantes a la temperatura ambiente.
Respuesta: 2.12 kW

4-68 Un dispositivo de pistón-cilindro aislado inicialmente contiene 0.3 m^3 de dióxido de carbono a 200 kPa y 27 °C. Se enciende una fuente de 110 V para que suministre corriente a un calentador de resistencia colocado en el interior de cilindro durante 10 min. La presión se mantiene constante durante el proceso, mientras que el volumen se duplica. Determine la corriente que pasa a través del calentador de resistencia.

4-69 Se comprime argón en un proceso politrópico, con n = 1.2, de 120 kPa y 10 °C hasta 800 kPa, en un dispositivo de cilindro-émbolo. Determine el trabajo producido y el calor transferido durante este proceso de compresión, en kJ/kg.

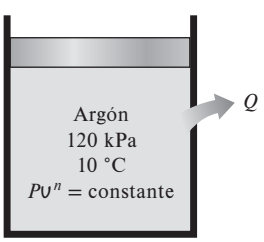


FIGURA P4-69

4-70 Un dispositivo cilindro-émbolo contiene 100 L de aire a 400 kPa y 25 °C. Se hace girar una rueda de paletas dentro del cilindro hasta alcanzar 15 kJ de trabajo en el aire mientras la presión se mantiene constante. Determine la temperatura final del aire. La energía almacenada en la rueda de paletas es insignificante.

4-71 En un dispositivo de cilindro-émbolo con carga variable y con una rueda de paletas integrada al cilindro, hay aire. Al principio está a 400 kPa y 17 °C. Entonces se hace girar la rueda de paletas mediante un motor eléctrico externo, hasta que se ha transferido al aire la energía de 75 kJ/kg en forma de trabajo. Durante este proceso se transfiere calor para mantener constante la temperatura del aire, y al mismo tiempo se triplica el volumen del gas. Calcule la cantidad requerida de transferencia de calor, en kJ/kg. *Respuesta:* 16.4 kJ/kg

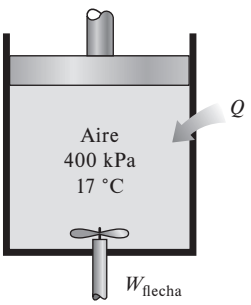


FIGURA P4-71

4-72 Una masa de 15 kg de aire, en un dispositivo de cilindro-émbolo, se calienta de 25 a 95 °C, haciendo pasar corriente por un calentador de resistencia en el interior del cilindro. La presión dentro del cilindro se mantiene constante en 300 kPa durante el proceso, y hay una pérdida de calor de 60 kJ. Determine los kWh de energía eléctrica suministrada.
Respuesta: 0.310 kWh

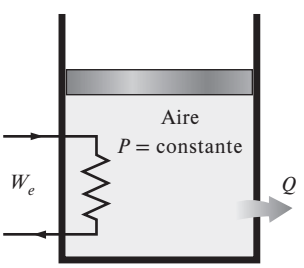


FIGURA P4-72

4-73E Un recipiente rígido adiabático de 3 $pies^3$ se divide en dos volúmenes iguales por medio de una membrana delgada, como se muestra en la figura P4-73E. Inicialmente, una de estas cámaras se llena de aire a 100 psia y 100 °F mientras la otra se vacía. Determine el cambio de energía interna del aire cuando la membrana se rompe. También determine la presión final del aire en el recipiente.

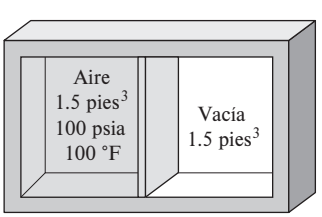


FIGURA P4-73E

4-74 Un dispositivo de émbolo contiene 2.2 kg de nitrógeno, inicialmente a 100 kPa y 25 °C. Entonces se comprime lenta-

mente el nitrógeno, en un proceso politrópico durante el cual $PV^{1.3}$ = constante, hasta que el volumen se reduce a la mitad. Determine el trabajo efectuado y la transferencia de calor para este proceso.

4-75 Regrese al problema 4.74. Use un programa apropiado para graficar el proceso descrito allí, en un diagrama *P-V*, e investigue el efecto del exponente politrópico *n* sobre el trabajo de la frontera y el calor transferido. Haga variar el exponente politrópico de 1.0 a 1.4. Trace las gráficas de trabajo de la frontera y calor transferido, en función del exponente politrópico, y describa los resultados.

4-76 Un dispositivo de pistón-cilindro contiene 4 kg de argón a 250 kPa y 35 °C. Durante un proceso de expansión isotérmico de cuasiequilibrio, el sistema realiza 15 kJ de trabajo de frontera y la rueda de paletas realiza 3 kJ en el sistema. Determine la transferencia de calor en este proceso.

4-77 Un dispositivo de pistón-cilindro de resorte contiene 5 kg de helio como sistema, como se muestra en la figura P4-77. Este sistema se calienta de 100 kPa y 20 °C a 800 kPa y 160 °C. Determine el calor transferido y el trabajo producido por este sistema.

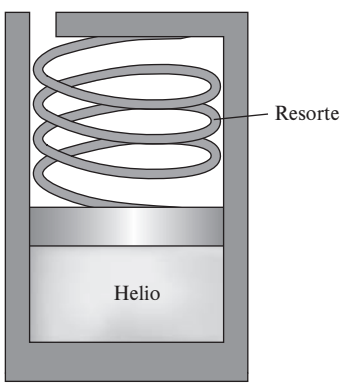


FIGURA P4-77

4-78 Un dispositivo de pistón-cilindro cuyo pistón descansa sobre uno de sus topes inicialmente contiene 0.5 kg de gas helio a 100 kPa y 25 °C. La masa del pistón es tal que se requieren 500 kPa de presión para elevarlo. ¿Qué tanto calor se debe transferir al helio antes de que el pistón comience a elevarse? *Respuesta:* 1 857 kJ

4-79 Un dispositivo de pistón-cilindro, cuyo pistón descansa sobre unos topes, inicialmente contiene 3 kg de aire a 200 kPa y 27 °C. La masa del pistón es tal que se requiere una presión de 400 Kpa. Se transfiere calor al aire hasta que su volumen se duplica. Determine el trabajo realizado por el aire y el calor total transferido al aire durante este proceso. También muestre el proceso en un diagrama *P-v*. *Respuestas:* 515 kJ, 2 674 kJ

Análisis de energía de sistemas cerrados: sólidos y líquidos

4-80 Un bloque de 1 kg de hierro se calienta de 25 a 75 °C. ¿Cuál es el cambio de la energía interna y entalpía total del hierro?

4-81E El estado de agua líquida cambia de 50 psia y 50 °F a 2 000 psia y 100 °F. Determine el cambio de energía interna y entalpía de esa agua, con base en *a*) las tablas de líquido comprimido, *b*) la aproximación para sustancias incompresibles y las tablas de propiedades, y *c*) el modelo de calor específico.

4-82E Durante un día de campo, en un cálido verano, todas las bebidas refrescantes desaparecieron con rapidez, y las únicas disponibles estaban al tiempo, a la temperatura ambiente de 85 °F. Para tratar de enfriar una lata de 12 onzas de bebida, una persona la toma y comienza a agitarla en el agua helada de la caja, a 32 °F. Use las propiedades del agua para modelar la bebida, y determine la masa de hielo que se fundirá para cuando la bebida se enfríe a 37 °F.

4-83 Un huevo común se puede aproximar como una esfera de 5.5 cm de diámetro. El huevo inicialmente está a una temperatura uniforme de 8 °C y se pone en agua hirviendo a 97 °C. Considerando que las propiedades del huevo son $\rho = 1\,020$ kg/m^3 y $c_p = 3.32$ kJ/kg·°C, determine qué tanto calor se transfiere al huevo en el momento en que la temperatura promedio del huevo se eleva a 80 °C.

4-84 Considere una plancha de 1 000 W, cuya base es de aleación de aluminio 2024-T6 ($\rho = 2\,770$ kg/m^3 y $c_p = 875$ J/kg · °C) y de 0.5 cm de espesor. Esa base tiene 0.03 m^2 de superficie. Primero, la plancha está en equilibrio térmico con el aire ambiente a 22 °C. Suponiendo que 90 por ciento del calor generado en los alambres de resistencia se transfiera a la base, determine el tiempo mínimo necesario para que la plancha llegue a 200 °C.

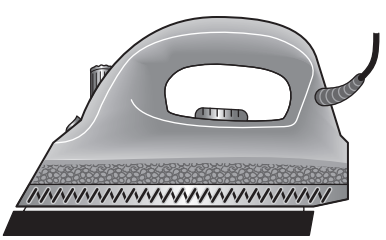


FIGURA P4-84

4-85 Unas bolas de rodamiento de acero inoxidable ($\rho = 8\,085$ kg/m^3 y $c_p = 0.480$ kJ/kg · °C) tienen 1.2 cm de diámetro, y a una razón de 800 bolas por minuto se van a templar en agua. Las bolas salen del horno a la temperatura uniforme de 900 °C, están en el aire a 25 °C durante un rato, y se dejan caer en agua. Si la temperatura de las bolas baja a 850 °C antes de su temple, determine la tasa de transferencia de calor, de las bolas al aire.

4-86E En una fábrica se calientan placas cuadradas de latón ($\rho = 532.5$ lbm/pies^3 y $c_p = 0.091$ Btu/lbm · °F), de 1.6 pulg de espesor y de 2 pies × 2 pies de dimensiones, que comienzan a una temperatura uniforme de 75 °F, haciéndolas pasar por un horno a 1 500 °F, 300 piezas por minuto. Si las placas permanecen en el horno hasta que su temperatura promedio aumenta a 900 °F, determine la tasa de transferencia de calor a las placas, en el horno.

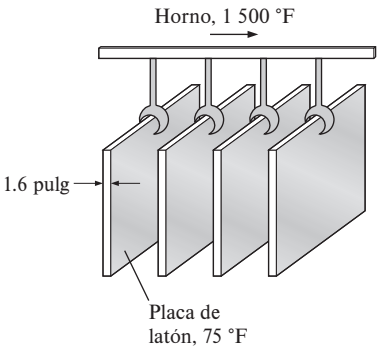


FIGURA P4-86E

4-87 Unas largas barras cilíndricas de acero ($\rho = 7\,833$ kg/m^3 y $c_p = 0.465$ kJ/kg · °C), de 8 cm de diámetro, se tratan térmicamente pasándolas a una velocidad de 2 m/min por un horno mantenido a 900 °C. Si las barras entran al horno a 30 °C y salen de él a una temperatura media de 500 °C, determine la tasa de transferencia térmica a las barras en el horno.

4-88 Un dispositivo electrónico disipa 25 W. Su masa es 20 g y su calor específico es 850 J/kg · °C. Se usa poco, y está encendido durante 5 min y después apagado durante varias horas, cuando se enfría a la temperatura ambiente de 25 °C. Determine la temperatura máxima posible del dispositivo al final del periodo de operación de 5 min. ¿Cuál sería su respuesta si ese dispositivo estuviera unido con un sumidero térmico de aluminio, de 0.5 kg? Suponga que el dispositivo y el disipador térmico están prácticamente a la misma temperatura.

4-89 Regrese al problema 4-88. Con un programa apropiado investigue el efecto de la masa del disipador térmico sobre la temperatura máxima del dispositivo. Haga variar la masa del disipador de 0 a 1 kg. Trace la gráfica de la temperatura máxima en función de la masa del disipador térmico, y describa los resultados.

4-90 Si alguna vez usted ha abofeteado a alguien o ha sido abofeteado, probablemente recuerde la sensación de quemadura. Imagine que ha tenido la desgracia de que una persona enojada lo abofetee, haciendo que la temperatura de su cara se eleve en 2.4 °C (¡duele!). Suponiendo que la mano que lo golpeó tiene una masa de 0.9 kg y que alrededor de 0.150 kg de tejido de la cara y de la mano se afecta por el incidente, estime la velocidad de la mano un instante antes del impacto. Tome el calor específico del tejido como 3.8 kJ/kg · K.

Tema especial: sistemas biológicos

4-91C ¿Para qué se utiliza la energía liberada durante el metabolismo en los humanos?

4-92C ¿Es el contenido de energía metabolizable de un alimento igual a la energía desprendida cuando se quema en una bomba calorimétrica? Si no es así, ¿en qué difieren?

4-93C ¿Es una consideración importante la cantidad de probables ocupantes, para diseñar los sistemas de calefacción y enfriamiento de los salones de clase? Explique por qué.

4-94C ¿Qué piensa usted acerca de un programa dietético que permite ingerir cantidades generosas de pan y arroz, siempre que no se les agregue mantequilla o margarina?

4-95 Considere dos habitaciones, una con un calentador de resistencia eléctrico de 2 kW y el otro con tres parejas bailando rápido. ¿En cuál habitación la temperatura del aire se elevará más rápido

4-96 El calor específico promedio del cuerpo humano es de 3.6 kJ/kg · °C. Si la temperatura corporal de un hombre de 80 kg se eleva de 37 °C a 39 °C al realizar algún ejercicio extenuante, determine el incremento en la energía térmica del cuerpo a consecuencia de esta elevación en la temperatura corporal.

4-97 Hay dos personas idénticas, de 80 kg, que comen alimentos idénticos y hacen cosas idénticas, pero uno de ellos trota 30 minutos diarios, y el otro ve la TV. Determine la diferencia de peso entre los dos, al cabo de un mes.
Respuesta: 1.04 kg

4-98 Una mujer pesa 68 kg, y quiere andar en bicicleta durante una hora. Si va a satisfacer todas sus necesidades energéticas mientras está en la bicicleta comiendo barras de chocolate de 30 g, determine cuántas barras necesita llevar con ella.

4-99 Una persona de 90 kg cede a la tentación, e ingiere toda una caja con 1 L de helado. ¿Cuánto tiempo debe trotar esa persona para quemar las calorías que consumió en el helado?
Respuesta: 1.54 h

4-100 Un hombre de 60 kg solía comer una manzana todos los días después de la cena sin perder o ganar peso. Ahora come una porción de 200 mL de helado en lugar de la manzana y camina 20 minutos diarios. Con esta nueva dieta, ¿cuánto peso perderá o ganará al mes? *Respuesta:* Ganará 0.087 kg

4-101 Un hombre tiene 20 kg de grasa corporal cuando comienza una huelga de hambre. Determine cuánto tiempo puede vivir sólo consumiendo su grasa.

4-102 Hay dos mujeres idénticas, de 50 kg, que hacen cosas idénticas y comen lo mismo, pero Dulce come papas con cuatro cucharaditas de mantequilla, mientras que María come las suyas sin mantequilla, cada noche. Determine la diferencia de pesos entre Dulce y María, al cabo de un año.
Respuesta: 6.5 kg

4-103E Un señor y una señora, de 190 lb y 130 lb, respectivamente, fueron a almorzar a un establecimiento de hamburguesas. El señor pidió un sándwich (720 Cal), papas fritas (400 Cal) y una Coca grande (225 Cal). La mujer pidió una hamburguesa simple (330 Cal), papas fritas (400 Cal) y Coca de dieta (0 Cal). Después del almuerzo, comienzan a palear nieve y quemar calorías, a una tasa de 420 Cal/h, la mujer, y 610 Cal/h, el señor. Determine cuánto tiempo necesitan palear nieve para quemar las calorías de su almuerzo.

4-104 Considere dos amigos que van a Burger King todos los días a desayunar. Uno de ellos pide un emparedado Double Whopper, una orden grande de papas fritas y una Coca grande (Calorías totales = 1 600) mientras que el otro pide un Whopper Junior, una orden chica de papas fritas y una Coca chica (Calorías totales = 800) todos los días. Si estos dos amigos se

parecen mucho y tienen la misma tasa metabólica, determine la diferencia en peso entre estos dos amigos en un año.

4-105 Una persona se come un emparedado Big Mac de McDonald's (530 Cal), una segunda persona se come un emparedado Burger King Whopper (640 cal), y una tercera persona se come 50 aceitunas con papas fritas regulares (350 Cal) como desayuno. Determine quién consume más calorías. Una aceituna contiene cerca de 5 Calorías.

4-106 Una copa de 5 oz de Bloody Mary contiene 14 g de alcohol y 5 g de carbohidratos, por lo tanto 116 Calorías. Una copa de 2.5 oz de martini contiene 22 g de alcohol y una cantidad insignificante de carbohidratos, y por consiguiente 156 Calorías. Una persona promedio quema 600 Calorías por hora mientras se ejercita en una máquina de esquiar a campo traviesa. Determine en cuánto tiempo quemará las calorías de una copa de *a*) Bloody Mary y *b*) martini en esta máquina de esquiar.

4-107E El intervalo de peso saludable para los adultos se suele expresar en función del *índice de masa corporal* (IMC), que se define, en unidades SI, como sigue:

$$\text{IMC} = \frac{W(\text{kg})}{H^2(\text{m}^2)}$$

donde W es el peso (en realidad, la masa) de la persona, en kg, y H su estatura, en m; el intervalo de peso saludable debe ser $19 \leq \text{IMC} \leq 25$. Convierta esta fórmula a unidades inglesas, de tal manera que el peso esté en libras y la estatura en pulgadas. También, calcule su propio IMC; si no está en el intervalo saludable, determine cuántas libras (o kg) necesita ganar o perder para estar en buenas condiciones.

4-108 El índice de masa corporal (IMC) de una mujer de 1.6 m que normalmente se come tres rebanadas grandes de pizza de queso y una Coca de 400 mL en el desayuno es 30. Ahora decide cambiar su desayuno a dos rebanadas de pizza y una Coca de 200 mL. Suponiendo que el déficit de calorías se compensa con la grasa corporal quemada, determine cuánto tiempo se requerirá para que el IMC de esta persona se reduzca a 20. Use los datos de valores calóricos incluidos en el libro y considere que el contenido de energía metabolizable de 1 kg de grasa corporal es de 33 100 kJ. *Respuesta:* 463 días

Problemas de repaso

4-109 ¿Cuál de los gases —neón o aire— requiere menos trabajo cuando se comprime es un sistema cerrado de P_1 a P_2 si se utiliza un proceso politrópico con $n = 1.5$?

4-110 ¿Cuál de los dos gases —neón o aire— produce más trabajo cuando se expande de P_1 a P_2 en un sistema politrópico de sistema cerrado con $n = 1.2$?

4.111 Considere un salón de clases que pierde calor hacia el exterior a razón de 12 000 kJ/h. Si hay 40 estudiantes en la clase, y cada uno disipa calor sensible a razón de 84 W, determine si es necesario encender la calefacción en el salón de clases para evitar que su temperatura se reduzca.

4-112 La temperatura del aire cambia de 0 a 10 °C mientras su velocidad cambia de cero a una velocidad final, y su elevación cambia de cero a la elevación final. ¿A qué valores de la velocidad final y elevación final del aire los cambios internos, cinéticos y de energía potencial serán iguales?
Respuestas: 120 m/s, 732 m

4-113 Un tanque rígido contiene una mezcla de gas con calor específico de $c_v = 0.748$ kJ/kg·K. La mezcla se enfría de 200 kPa y 200 °C hasta que su presión es de 100 kPa. Determine la transferencia de calor durante este proceso, en kJ/kg.

4-114 Considere un dispositivo cilindro-émbolo que contiene 0.5 kg de aire. Después se transfiere calor al aire a una presión constante y la temperatura del aire aumenta 5 °C. Determine el trabajo de expansión realizado durante el proceso.

4-115 Un dispositivo de pistón-cilindro contiene una masa de 0.2 kg de refrigerante 134a saturado a 200 kPa. Inicialmente, el 75 por ciento de la masa está en la fase líquida. Ahora se transfiere calor al refrigerante a presión constante hasta que el cilindro contiene sólo vapor. Muestre el proceso en un diagrama P-v con respecto a las líneas de saturación. Determine *a*) el volumen ocupado por el refrigerante al inicio, *b*) el trabajo realizado, y *c*) la transferencia de calor total.

4-116E Un recipiente rígido bien aislado contiene 2 lbm de aire equipado con una rueda de paletas. El estado inicial de este aire es de 30 psia y 60 °F. ¿Cuánto trabajo, en Btu, debe transferirse al aire con la rueda de paletas para elevar la presión del aire a 40 psia? También, ¿cuál es la temperatura final del aire?

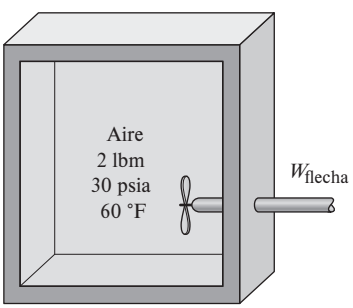


FIGURA P4-116E

4-117 Se expande aire en un proceso politrópico con $n = 1.2$, de 1 MPa y 400 °C a 110 kPa, en un dispositivo de cilindro-émbolo. Determine la temperatura final del aire.

4-118 Nitrógeno a 100 kPa y 25 °C se calienta en un recipiente rígido hasta que su presión es 300 kPa. Calcule el trabajo que se realiza y el calor que se transfiere durante este proceso, en kJ/kg.

4-119 Un recipiente rígido bien aislado contiene 3 kg de agua líquida saturada a 40 °C. El recipiente también contiene una resistencia eléctrica que pasa 10 amperes cuando se le aplican 50 volts. Determine la temperatura final en el recipiente, cuando la resistencia ha estado trabajando durante 30 minutos.

4-120 Dentro de un dispositivo de cilindro-émbolo hay 3 kg de un vapor húmedo de agua a 160 kPa. Al principio hay 1 kg de agua en la fase líquida, y el resto está en la fase de vapor. Entonces, se transfiere calor al agua; el émbolo, que descansa en un conjunto de topes, comienza a subir cuando la presión en el interior llega a 500 kPa. La transferencia de calor

continúa hasta que el volumen total aumenta en 20 por ciento. Determine *a*) las temperaturas inicial y final, *b*) la masa del agua líquida cuando comienza a subir el émbolo y *c*) el trabajo efectuado durante este proceso. También trace el proceso en un diagrama *P*-*v*.

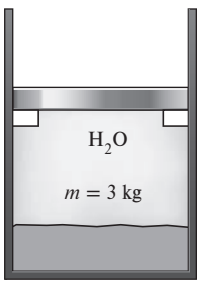


FIGURA P4-120

4-121 Un dispositivo de pistón-cilindro contiene una masa de 12 kg de vapor refrigerante 134a a 240 kPa. Entonces se transfieren 300 kJ de calor al refrigerante a presión constante mientras que una fuente de 110 V suministra corriente a un resistor dentro del cilindro durante 6 min. Determine la corriente suministrada si la temperatura final es 70 °C. También muestre el proceso en un diagrama *T*-*v* con respecto a las líneas de saturación. *Respuesta:* 12.8 A

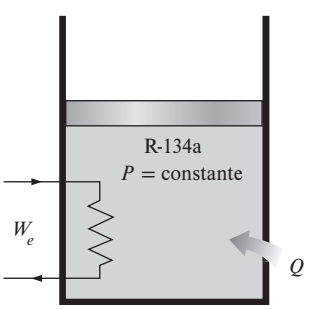


FIGURA P4-121

4-122 Vapor saturado de agua a 200 °C se condensa como líquido saturado a 50 °C, en un dispositivo de cilindro-émbolo. Determine la transferencia de calor para este proceso, en kJ/kg.

4-123 Un dispositivo de cilindro-émbolo contiene 0.2 m^3 de gas de helio a 100 kPa y 10 °C. Entonces, el helio se comprime en un proceso politrópico (Pv^n = constante) hasta 700 kPa y 290 °C. Determine el calor perdido o ganado durante este proceso. *Respuesta:* Se pierden 6.51 kJ

FIGURA P4-123

4-124 Un dispositivo de pistón-cilindro sin fricción inicialmente contiene aire a 100 kPa y 0.15 m^3. En este estado, un resorte lineal ($F \propto x$) toca el pistón pero no ejerce fuerza sobre él. Ahora se calienta el aire hasta una estado final de 0.45 m^3 y 800 kPa. Determine *a*) el trabajo total realizado por el aire y *b*) el trabajo realizado contra el resorte. También, muestre el proceso en un diagrama *P*-*v*. *Respuestas: a*) 135 kJ, *b*) 105 kJ

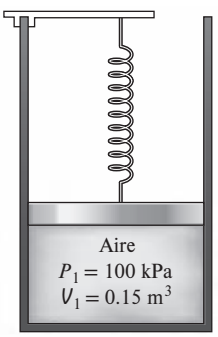


FIGURA P4-124

4-125 Un dispositivo de pistón-cilindro sin fricción y un tanque rígido inicialmente contienen, cada uno, 12 kg de un gas ideal a la misma temperatura, presión y volumen. Se desea elevar la temperatura de ambos sistemas 15 °C. Determine la cantidad adicional de calor que debe suministrarse al gas en el cilindro, el cual se mantiene a presión constante para obtener este resultado. Suponga que la masa molar del gas es 25.

4-126 Un dispositivo de pistón-cilindro aislado, inicialmente contiene 0.01 m^3 de una mezcla saturada de líquido-vapor con una calidad de 0.2 a 120 °C. Luego se agrega un poco de hielo a 0 °C al cilindro. Si el cilindro contiene líquido saturado a 120 °C cuando se establece el equilibrio térmico, determine la cantidad de hielo agregado. La temperatura y el calor de fusión del hielo a presión atmosférica son 0 °C y 333.7 kJ/kg, respectivamente.

4-127 Una casa con calentamiento solar pasivo, pierde calor al ambiente, a una tasa promedio de 50 000 kJ/h; se mantiene siempre a 22 °C durante una noche invernal, durante 10 h. La casa se va a calentar con 50 recipientes de vidrio, y cada uno

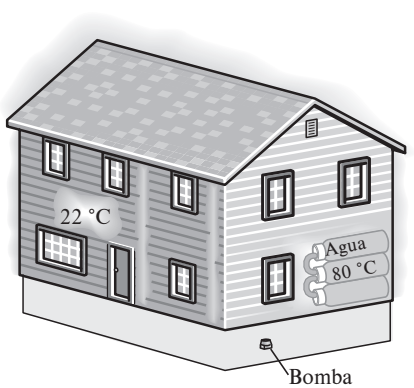


FIGURA P4-127

de ellos contiene 20 L de agua que se calienta durante el día hasta 80 °C absorbiendo energía solar. Hay un calentador eléctrico de respaldo, controlado por termostato, de 15 kW, que se enciende cuando es necesario para mantener la casa a 22 °C. *a*) ¿Cuánto tiempo trabaja el sistema eléctrico esa noche? *b*) ¿Cuánto tiempo trabajaría el calentador eléctrico esa noche, si la casa no tuviera calentamiento solar?

Respuestas: a) 4.77 h, *b*) 9.26 h

4-128 Se hierve agua al nivel del mar en una cafetera equipada con un elemento de calefacción eléctrica sumergible. La cafetera contiene 1 L de agua cuando está llena. Después de hervir durante 13 minutos se observa que la mitad del agua se ha evaporado. Determine la potencia nominal del elemento de calefacción eléctrica sumergido en el agua. También determine cuánto tardará este calentador en elevar la temperatura de 1 L de agua fría, de 18 °C al punto de ebullición.

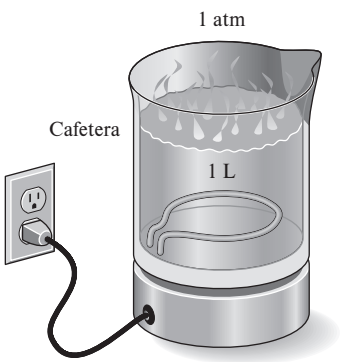


FIGURA P4-128

4-129 Se va a determinar el contenido de energía en cierto alimento, en una bomba calorimétrica que contiene 3 kg de agua; se queman 2 g de la muestra en presencia de 100 g de aire, en la cámara de reacción. Si la temperatura del agua aumenta 3.2 °C cuando se establece el equilibrio, determine el contenido energético del alimento, en kJ/kg, ignorando la energía térmica almacenada en la cámara de reacción, y la energía suministrada por el mezclador. ¿Cuál es el error aproximado que se comete al no considerar la energía térmica almacenada en la cámara de reacción? *Respuesta:* 20 060 kJ/kg

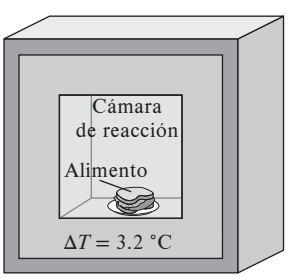


FIGURA P4-129

4-130 Una persona pesa 68 kg, y su temperatura corporal promedio es 39 °C; toma 1 L de agua fría a 3 °C, para tratar de enfriarse. Suponiendo que el calor específico promedio de ese hombre es 3.6 kJ/kg · °C, calcule la disminución de la temperatura corporal media de esa persona, debida a esa agua fría.

4-131 Un dispositivo de pistón-cilindro aislado inicialmente contiene 1.8 kg de agua líquida saturada a 120 °C. Un resistor eléctrico colocado en el cilindro se enciende durante 10 min hasta que el volumen se cuadruplica. Determine *a*) el volumen del cilindro, *b*) la temperatura final, y *c*) la potencia eléctrica nominal del resistor.

Respuestas: a) 0.00763 m^3, *b*) 120 °C, *c*) 0.0236 kW.

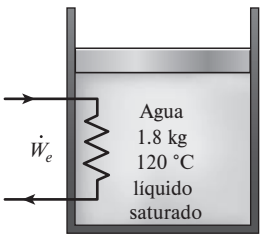


FIGURA P4-131

4-132 Un tanque rígido aislado contiene 1.4 kg de agua líquida saturada a 200 °C y aire. En este estado, 25 por ciento de su volumen es ocupado por agua líquida y el resto por aire. Luego se coloca una resistencia eléctrica en el tanque y se enciende. Después de 20 minutos se observa que el tanque contiene vapor de agua saturado después de 20 min. Determine *a*) el volumen del tanque, *b*) la temperatura final y *c*) la potencia eléctrica nominal de la resistencia. Ignore la energía añadida al aire.

Respuestas: a) 0.00648 m^3, *b*) 371 °C, *c*) 1.58 kW

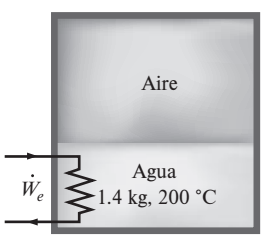


FIGURA P4-132

4-133 Para enfriar una tonelada de agua a 20 °C en un tanque aislado, una persona vierte 130 kg de hielo a −5 °C en el agua. Determine la temperatura de equilibrio final en el tanque. La temperatura y el calor de fusión del hielo a presión atmosférica son 0 °C y 333.7 kJ/kg, respectivamente.

Respuesta: 8.2 °C

4-134 Un vaso de 0.3 L de agua con hielo a 20 °C se va a enfriar a 5 °C. Determine cuánto hielo hay que agregar al agua, en gramos, si el hielo está *a*) a 0 °C y *b*) a −20 °C. También determine cuánta agua se requeriría si el enfriamiento se hiciera con agua fría a 0 °C. La temperatura y el calor de fusión del hielo a presión atmosférica son 0 °C y 333.7 kJ/kg, respectivamente, y la densidad del agua es 1 kg/L.

4-135 Reconsidere el poblema 4-134, y con un programa apropiado investigue el efecto de la temperatura inicial del hielo en la masa final requerida. Permita que la temperatura del hielo varíe de −26 a 0 °C. Grafique la masa de hielo contra la temperatura inicial del hielo, y comente los resultados.

4-136 Un recinto de 3 m × 4 m × 6 m de dimensiones, bien aislado, está a 7 °C. Entonces se calienta con un sistema de calefacción que consta de un radiador con vapor de agua. El volumen del radiador es 15 L, y se llena con vapor sobrecalentado de agua a 200 kPa y 200 °C. En ese momento se deben cerrar las válvulas de entrada y salida del radiador. Se usa un ventilador de 120 W de potencia para distribuir el aire en el recinto. Se observa que la presión del vapor de agua baja a 100 kPa en 45 min, debido a la transferencia de calor al recinto. Suponiendo calores específicos constantes para el aire a temperatura ambiente, determine la temperatura promedio del aire a los 45 min. Suponga que la presión del aire en el recinto permanece constante en 100 kPa.

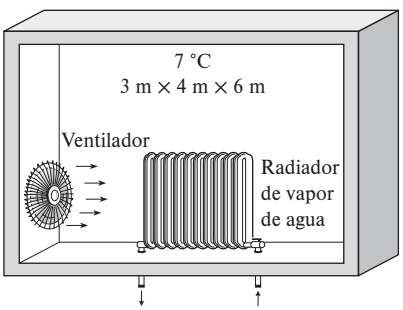


FIGURA P4-136

4-137 Dos cámaras adiabáticas de 2 m^3 cada una, están interconectadas por una válvula, como se muestra en la figura P4-137, con una cámara que contiene oxígeno a 1 000 kPa y 127 °C y la otra cámara vacía. Ahora se abre la válvula hasta que el oxígeno llena las dos cámaras y ambas tienen la misma presión. Determine el cambio de energía interna total y la presión final en las cámaras.

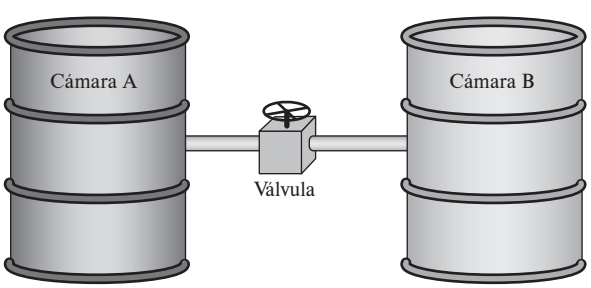


FIGURA P4-137

4-138 Dos tanques rígidos están conectados por una válvula. El tanque A contiene 0.2 m^3 de agua a 400 kPa y 80 por ciento de calidad. El tanque B contiene 0.5 m^3 de agua a 200 kPa y 250 °C. Ahora se abre la válvula, y los dos tanques finalmente están en el mismo estado. Determine la presión y la cantidad de transferencia de calor cuando el sistema alcanza el equilibrio térmico con el medio ambiente a 25 °C.

Respuestas: 317 kPa, 2 170 kJ.

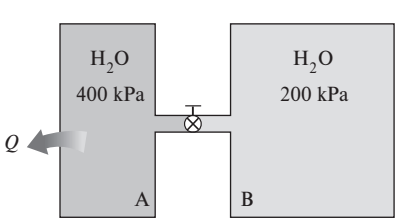


FIGURA P4-138

4-139 Reconsidere el problema 4-138 y con un programa apropiado investigue el efecto de la temperatura ambiental sobre la presión final y la transferencia de calor. Contemple una variación de temperatura de 0 a 50 °C. Grafique los resultados finales en función de la temperatura ambiental, y analice los resultados.

4-140 Un dispositivo de pistón-cilindro vertical de 10 cm de diámetro contiene un gas ideal a 1 bar y 24 °C. Inicialmente, la cara interna del pistón es de 20 cm desde la base del cilindro. Luego un eje externo conectado al pistón ejerce una fuerza equivalente a una entrada de trabajo de frontera de 0.1 kJ. La temperatura del gas permanece constante durante el proceso. Determine *a*) la cantidad de transferencia de calor, *b*) la presión final en el cilindro, y *c*) la distancia que se desplaza el pistón.

4-141 Un dispositivo de pistón-cilindro inicialmente contiene 0.35 kg de vapor a 3.5 MPa, con sobrecalentamiento de 7.4 °C. Luego el vapor pierde calor hacia el ambiente y el pistón desciende y choca con los topes y en este momento el cilindro contiene agua líquida saturada. El enfriamiento continúa hasta que el cilindro contiene agua a 200 °C. Determine *a*) la presión final, *b*) el trabajo de frontera, *c*) la cantidad de transferencia de calor cuando el pistón choca con los topes, y *d*) la transferencia de calor total.

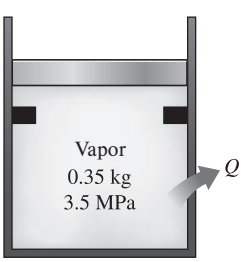


FIGURA P4-141

4-142E Dos tanques adiabáticos de 10 $pies^3$ están conectados por una válvula. Inicialmente un tanque contiene agua a 450 psia con calidad de 10 por ciento, mientras que el segundo contiene agua a 15 psia con calidad de 75 por ciento. Ahora se abre la válvula, y el vapor del agua del tanque de alta presión se pasa al tanque de baja presión hasta que la presión es igual en los dos. Determine la presión final y la masa final en cada tanque.

Respuestas: 313 psia, 41.6 lbm

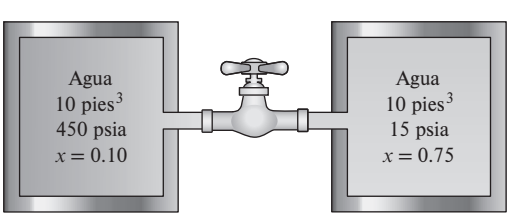


FIGURA P4-142E

4-143 Un recipiente rígido aislado está dividido en dos compartimientos de distintos volúmenes. Al principio, cada compartimiento contiene el mismo gas ideal a idéntica presión, pero con diferentes temperaturas y masas. Se quita la pared que divide los dos compartimientos, y se deja que se mezclen los gases. Suponiendo que los calores específicos son constantes, deduzca la ecuación más sencilla para determinar la temperatura de la mezcla, que tenga la forma

$$T_3 = f\left(\frac{m_1}{m_3}, \frac{m_2}{m_3}, T_1, T_2\right)$$

donde m_3 y T_3 son masa y temperatura de la mezcla final, respectivamente.

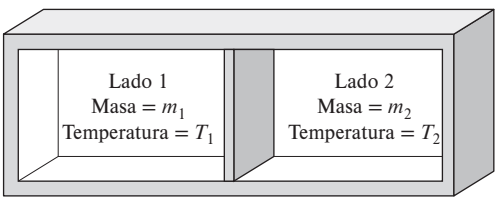


FIGURA P4-143

4-144 En edificios con calefacción solar, la energía suele almacenarse como calor sensible en rocas, concreto o agua durante el día para utilizarse por la noche. Para minimizar el espacio de almacenamiento es recomendable utilizar un material capaz de almacenar una gran cantidad de calor y que a la vez experimenten cambios térmicos pequeños. Se puede almacenar una gran cantidad de calor a una temperatura constante durante un proceso de cambio de fase, por lo que los materiales que cambian de fase aproximadamente a la temperatura ambiente como la sal de Glauber (o sulfato sódico decahidratado), que tiene un punto de fusión de 32 °C y un calor latente de fusión de 329 kJ/L, son ideales para este propósito. Determine cuánto calor puede almacenarse en un espacio usando *a*) sal de Glauber que experimenta un cambio de fase, *b*) rocas de granito con una capacidad calorífica de 2.32 kJ/kg · °C y un cambio de temperatura de 20 °C, y *c*) agua con una capacidad calorífica de 4.00 kJ/k · °C y un cambio de temperatura de 20 °C.

Problemas para el examen de fundamentos de ingeniería

4-145 Un recipiente rígido de 3 m^3 contiene gas de nitrógeno a 500 kPa y 300 K. Entonces, se transfiere calor al nitrógeno, y su presión se eleva hasta 800 kPa. El trabajo efectuado durante este proceso es

a) 500 kJ *b*) 1500 kJ *c*) 0 kJ
d) 900 kJ *e*) 2 400 kJ

4-146 Un recipiente rígido de 0.5 m^3 contiene gas de nitrógeno a 600 kPa y 300 K. Entonces, se comprime isotérmicamente el gas hasta un volumen de 0.2 m^3. El trabajo efectuado sobre el gas durante este proceso de compresión es

a) 82 kJ *b*) 180 kJ *c*) 240 kJ
d) 275 kJ *e*) 315 kJ

4-147 Un salón bien sellado contiene 60 kg de aire a 200 kPa y 25 °C. Entonces, entra la energía solar al salón, a una razón promedio de 0.8 kJ/s, mientras que se enciende un ventilador de 120 W, para hacer circular el aire en el interior. Si se ignora la transferencia de calor a través de las paredes, en 30 min la temperatura en el salón será

a) 25.6 °C *b*) 49.8 °C *c*) 53.4 °C
d) 52.5 °C *e*) 63.4 °C

4-148 Un salón contiene 75 kg de aire a 100 kPa y 15 °C. En él hay un refrigerador, que consume 250 W de electricidad cuando está funcionando; también una TV de 120 W, un calentador de resistencia eléctrica de 1.8 kW y un ventilador de 50 W. Durante un día invernal frío, se observa que el refrigerador, la TV, el ventilador y la resistencia eléctrica están trabajando continuamente, pero que la temperatura del aire en el interior permanece constante. Entonces, la tasa de pérdida de calor del recinto, en ese día, es

a) 5 832 kJ/h *b*) 6 192 kJ/h *c*) 7560 kJ/h
d) 7 632 kJ/h *e*) 7 992 kJ/h

4-149 Un dispositivo de pistón-cilindro sin fricción y un tanque rígido contienen 3 kmol de un gas ideal a la misma temperatura, presión y volumen. Luego se transfiere calor, y la temperatura de ambos sistemas se eleva 10 °C. La cantidad de calor adicional que se debe suministrar al gas en el cilindro que se mantiene a presión constante es

a) 0 kJ *b*) 27 kJ *c*) 83 kJ
d) 249 kJ *e*) 300 kJ

4-150 Un dispositivo de pistón-cilindro contiene 5 kg de aire a 400 kPa y 30 °C. Durante un proceso de expansión isotérmico de cuasi equilibrio, el sistema realiza 15 kJ de trabajo de frontera, y la rueda de paleta realiza 3 kJ de trabajo en el sistema. La transferencia de calor durante este proceso es

a) 12 g *b*) 18 kJ *c*) 2.4 kJ
d) 3.5 kJ *e*) 60 kJ

4-151 Un vaso contiene 0.32 kg de agua a 20 °C, y se va a enfriar a 0 °C, agregándole cubos de hielo a 0 °C. El calor latente de fusión de hielo es 334 kJ/kg, y el calor específico del agua es 4.18 kJ/kg · °C. La cantidad de hielo que debe agregarse es

a) 32 g *b*) 40 g *c*) 80 g
d) 93 g *e*) 110 g

4-152 Un calentador de resistencia eléctrica, de 2 kW, se sumerge en 5 kg de agua, y se enciende y permanece encendido 10 min. Durante el proceso, el agua pierde 300 kJ de calor. Entonces, el aumento de temperatura del agua es

a) 0.4 °C *b*) 43.1 °C *c*) 57.4 °C
d) 71.8 °C *e*) 180 °C

4-153 Un calefactor de resistencia eléctrico de rodapié de 2 kW en una habitación vacía se enciende y se mantiene así durante 15 min. La masa del aire en la habitación es de 75 kg y la habitación está herméticamente sellada de modo que no puede entrar ni salir aire. La elevación de la temperatura del aire al final de los 15 min es

a) 8.5 °C *b*) 12.4 °C *c*) 24.0 °C
d) 33.4 °C *e*) 54.8 °C

4-154 1.5 kg de agua líquida inicialmente a 12 °C se va a calentar a 95 °C en una tetera equipada con elemento de calentamiento eléctrico de 800 W en su interior. Se puede considerar que el calor específico del agua es 4.18 kJ/kg · °C, y se puede ignorar la pérdida de calor del agua durante el calentamiento. El tiempo que tarda el agua para llegar a la temperatura deseada es

a) 5.9 min *b*) 7.3 min *c*) 10.8 min
d) 14.0 min *e*) 17.0 min

4-155 Un recipiente equipado con un calentador de resistencia y mezcladora inicialmente se llena con 3.6 kg de vapor de agua saturado a 120 °C. Luego el calentador y la mezcladora se ponen a funcionar, y el vapor se comprime y se pierde calor hacia el ambiente. Al final del proceso, la temperatura y presión del vapor en el recipiente es de 300 °C y 0.5 Mpa. La transferencia de energía neta al vapor durante este proceso es

a) 274 kJ *b*) 914 kJ *c*) 1 213 kJ
d) 988 kJ *e*) 1 291 kJ

4-156 Un huevo ordinario tiene 0.1 kg de masa, y su calor específico es 3.32 kJ/kg · °C; se introduce en agua hirviente a 95 °C. Si la temperatura inicial del huevo es 5 °C, la cantidad máxima de calor transferido a él es

a) 12 kJ *b*) 30 kJ *c*) 24 kJ
d) 18 kJ *e*) infinita

4-157 Una manzana con una masa promedio de 0.18 kg y calor específico promedio de 3.65 kJ/kg · °C se enfría de 17 °C a 5 °C. La cantidad de calor transferida a la manzana es

a) 7.9 kJ *b*) 11.2 kJ *c*) 14.5 kJ
d) 17.6 kJ *e*) 19.1 kJ

4-158 Un paquete de seis bebidas enlatadas se va a enfriar de 18 °C a 3 °C. La masa de cada bebida enlatada es de 0.335 kg. Éstas se pueden considerar como agua, y la energía guardada en la lata de aluminio es insignificante. La cantidad de transferencia de calor de las seis bebidas enlatadas es

a) 22 kJ *b*) 32 kJ *c*) 134 kJ
d) 187 kJ *e*) 223 kJ

4-159 Una habitación se llena de vapor saturado a 100 °C. Luego se coloca una bola de boliche de 5 kg a 25 °C en la habitación. Se transfiere calor a la bola del vapor, y la temperatura de ésta se eleva a 100 °C en tanto que el vapor se condensa en la bola a medida que pierde calor (pero sigue a 100 °C). El calor específico de la bola se puede considerar como 1.8 kJ/kg · °C. La masa del vapor condensado durante este proceso es

a) 80 g *b*) 128 g *c*) 299 g
d) 351 g *e*) 405 g

4-160 Un gas ideal tiene una constante de gas $R = 0.3$ kJ/kg · K, y el calor específico a volumen constante es $c_v = 0.7$ kJ/kg · K. Si el gas tiene un cambio de temperatura de 100 °C, elija la respuesta correcta para cada una de los siguientes casos:

1. El cambio en entalpía es, en kJ/kg,
   a) 30 *b*) 70 *c*) 100
   d) Información insuficiente para determinarlo.
2. El cambio en la energía interna es, en kJ/kg,
   a) 30 *b*) 70 *c*) 100
   d) Información insuficiente para determinarlo.
3. El trabajo realizado es, en kJ/kg,
   a) 30 *b*) 70 *c*) 100
   d) Información insuficiente para determinarlo.
4. La transferencia de calor es, en kJ/kg,
   a) 30 *b*) 70 *c*) 100
   d) Información insuficiente para determinarla.
5. El cambio en el producto presión-volumen es, en kJ/kg
   a) 30 *b*) 70 *c*) 100
   d) Información insuficiente para determinarlo.

4-161 Un dispositivo de pistón-cilindro contiene vapor saturado. Mientras se agrega calor al vapor, el pistón se mantiene estacionario, y la presión y temperatura llegan a ser de 1.2 MPa y 700 °C, respectivamente Se agrega más calor al vapor hasta que su temperatura se eleva a 1 200 °C, y el pistón se mueve para mantener una presión constante.

1. La presión inicial del vapor es de casi
   a) 250 kPa *b*) 500 kPa *c*) 750 kPa
   d) 1 000 kPa *e*) 1 250 kPa
2. El trabajo realizado por el vapor es de casi
   a) 230 kJ/kg *b*) 1 100 kJ/kg *c*) 2 140 kJ/kg
   d) 2 340 kJ/kg *e*) 840 kJ/kg
3. El calor total transferido al vapor es de casi
   a) 230 kJ/kg *b*) 1 110 kJ/kg *c*) 2 140 kJ/kg
   d) 2 340 kJ/kg *e*) 840 kJ/kg

4-162 Un dispositivo de pistón-cilindro contiene un gas ideal. El gas se somete a dos procesos de enfriamiento sucesivos en los que libera calor al ambiente. Primero el gas se enfría a presión constante hasta que $T_2 = \frac{3}{4}T_1$. Luego el pistón se mantiene estacionario mientras el gas se enfría aún más hasta que $T_3 = \frac{1}{2}T_1$, donde todas las temperaturas están en K.

1. La razón del volumen final al volumen inicial del gas es
   a) 0.25 *b*) 0.50 *c*) 0.67
   d) 0.75 *e*) 1.0
2. El trabajo realizado en el gas por el pistón es
   a) $RT_1/4$ *b*) $c_vT_1/2$ *c*) $c_pT_1/2$
   d) $(c_v + c_p)T_1/4$ *e*) $c_v(T_1 + T_2)/2$
3. La transferencia de calor total del gas es
   a) $RT_1/4$ *b*) $c_vT_1/2$ *c*) $c_pT_1/2$
   d) $(c_v + c_p)T_1/4$ *e*) $c_v(T_1 + T_3)/2$

Problemas de diseño, ensayo y experimentación

4.163 Averigüe cómo se determinan los calores específicos de los gases, líquidos y sólidos en los laboratorios nacionales. Describa los aparatos experimentales y procedimientos utilizados.

4-164 Se le pide diseñar un sistema de calefacción para una alberca de 2 m de profundidad, 25 m de largo y 25 m de ancho. Su cliente desea que el sistema tenga la capacidad suficiente para elevar la temperatura del agua de 20 a 30 °C en 3 h. Se estima que la tasa de pérdida de calor del agua al aire, en condiciones de diseño a la intemperie, es de 960 W/m^2, y el calentador también debe poder mantener los 30 °C en la alberca, en esas condiciones. Se espera que las pérdidas de calor al suelo sean pequeñas y se puedan omitir. El calentador que se planea es uno con quemador de gas natural cuya eficiencia es 80 por ciento. ¿Qué capacidad de quemador (en kW alimentados) recomendaría usted a su cliente?

4-165 Con la ayuda de un termómetro mida la temperatura de ebullición del agua y calcule la presión de saturación correspondiente. Con esta información, estime la altitud de su población y compárela con el valor de la altitud real.

4-166 Se utilizan gases comprimidos y líquidos que cambian de fase para almacenar energía en recipientes rígidos. ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de cada sustancia como medio para almacenar energía?

4-167 Un artículo (FS#204) del *U.S. Department of Energy* de 1982 afirma que una fuga de una gota de agua caliente por segundo puede costar $1.00 por mes. Haciendo suposiciones razonables con respecto al tamaño de la gota y el costo unitario de la energía, determine si esta afirmación es razonable.

4-168 Diseñe un experimento con instrumentos para determinar los calores específicos de un gas utilizando un calentador de resistencia. Analice cómo realizará este experimento, qué medidas deberá tomar y cómo determinará los calores específicos. ¿Qué fuentes de error hay en su sistema? ¿Cómo puede minimizar el error experimental? ¿Cómo modificaría este sistema para determinar el calor específico de un sólido?